

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

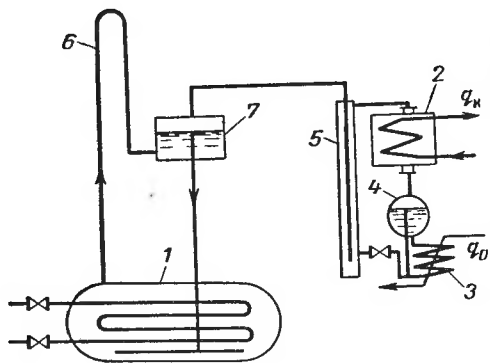


Рис. 6-12. Принципиальная схема абсорбционной холодильной установки периодического действия.

1 — генератор-абсорбер; 2 — конденсатор; 3 — испаритель; 4 — сборник хладагента; 5 — дренажный стояк; 6 — гидрозатвор; 7 — бак зазора.

для температур кипения в испарителе в интервале $+5 \div -45^\circ \text{C}$; двухступенчатые, применяемые при наличии источника тепла низкого потенциала или для низких температур кипения ($-50 \div -60^\circ \text{C}$).

В установках периодического действия (рис. 6-12) один и тот же аппарат 1 выполняет попеременно функции генератора и абсорбера. В первый период, носящий название зарядки, производится выпаривание крепкого раствора. Образующиеся при этом концентрированные пары низкокипящего компонента уходят в конденсатор 2, а оттуда в виде конденсата направляются в испаритель 3 и в нем накапливаются. Во втором периоде, носящем название разрядки, происходит кипение жидкости в испарителе и поглощение паров в генераторе-абсорбере. Для этой цели к змеевику генератора-абсорбера вместо горячего пара подводится охлаждающая вода. Совокупность периодов зарядки и разрядки носит название периода цикла. Во избежание слишком большой частоты циклов аппараты должны быть рассчитаны на емкость, достаточную для накопления на весь период зарядки или разрядки всего запаса водоаммиачного раствора или аммиака.

Возможно комбинирование двух машин периодического действия с перемежающимися периодами, и тогда два генератора-абсорбера работают одновременно, причем если один из них работает в качестве генератора, то другой — в качестве абсорбера. После окончания периода зарядки аппараты меняются ролями, благодаря чему обеспечивается непрерывность холодильного действия. Такие мелкие установки перспективны, например, для молочных и маслодельных заводов, где энергетические и габаритные недостатки имеют обычно меньшее значение, чем свойственная этим установкам простота их обслуживания.

Идеальный цикл абсорбционной холодильной машины показан на $T-s$ -диаграмме (рис. 6-13). Первая площадка (1—2—3—4—1) характеризует тепло q_h , поданное в генератор при наивысшей температуре T_h . Вторая площадка (4—5—6—7—4) определяет тепло q_0 , подан-

ное в испаритель при наиболее низкой температуре T_0 . Наконец, третья площадка (1—8—9—7—1) определяет тепло q_{k+a} , отведенное из конденсатора и абсорбера при температуре охлаждающей воды T_b .

Поскольку в идеальном круговом цикле суммарное изменение энтропии равно нулю и, следовательно,

$$\frac{q_h}{T_h} + \frac{q_0}{T_0} = \frac{q_{k+a}}{T_b},$$

а с другой стороны

$$q_h + q_0 = q_{k+a},$$

то в результате тепловой коэффициент ϵ_A можно записать как

$$\epsilon_A = \frac{q_0}{q_h} = \frac{\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T_h}}{\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_b}}. \quad (6-19)$$

Из формулы (6-19) следует, что тепловой коэффициент идеального цикла увеличивается с повышением температуры T_h и температуры T_0 и уменьшается с повышением температуры охлаждающей воды T_b .

Преимущественное применение абсорбционных холодильных машин целесообразно там, где имеется дешевый источник внешнего греющего тепла или обеспечивается возможность комбинированного производства тепла и холода. Такая возможность заключается прежде всего в использовании на предприятиях, нуждающихся в тепле и в искусственном холоде, отработавшего пара. В связи с развитием теплофикации и крупных производств, нуждающихся одновременно в тепловой энергии и в искусственном холоде, абсорбционные установки приобретают особое значение.

6-8. ПРОЦЕССЫ АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА $i-\xi$ -ДИАГРАММЕ

Для практических расчетов в области аммиачных абсорбционных холодильных машин наибольшее распространение получила тепловая диаграмма $i-\xi$,

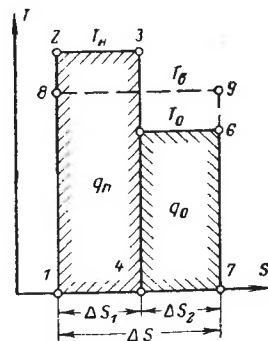


Рис. 6-13. Идеальный холодильный цикл абсорбционной установки на $T-s$ -диаграмме.

причем

$$\xi = \frac{G_{\text{NH}_3}}{G_{\text{NH}_3} + G_{\text{H}_2\text{O}}}, \text{ кг NH}_3/\text{кг смеси},$$

характеризует количество килограммов аммиака в 1 кг водоаммиачной смеси.

Если из абсорбера в генератор подано в час F , кг, крепкого раствора с концентрацией ξ_k (см. рис. 6-11) и за этот же промежуток времени в генераторе из раствора выпаривается D , кг, пара высокой концентрации ξ_n , то в абсорбер возвращается $(F-D)$, кг, слабого раствора с концентрацией ξ_c . Исходя из материального баланса по аммиаку, получаем:

$$F\xi_k = (F-D)\xi_c + D\xi_n. \quad (6-20)$$

Относя количество крепкого раствора к 1 кг уходящих в конденсатор паров, получим удельную циркуляцию крепкого раствора, т. е. количество циркулирующего крепкого раствора на 1 кг аммиака — кратность циркуляции:

$$f = \frac{F}{D} = \frac{\xi_n - \xi_c}{\xi_k - \xi_c}. \quad (6-21)$$

Величину $(\xi_k - \xi_c)$ называют зоной дегазации. Концентрация пара, уходящего из генератора всегда, естественно, меньше единицы. Во избежание попадания воды в конденсатор и затем в испаритель по пути из генератора в конденсатор устанавливают ректификатор, служащий аппаратом для отделения водяных паров. Необходимо подчеркнуть, что попадание воды в конденсатор совершенно недопустимо по эксплуатационным соображениям (замерзание воды и накопление в испарительной системе крепкого раствора вместо жидкого аммиака, что приводит к повышению температуры испарения при том же давлении). Практически с помощью ректификатора можно достичь концентрации паров перед конденсатором $\xi_c = 0,995$. В расчетах исходят из полной ректификации с учетом коэффициентов потерь, свойственных действительному циклу машины.

Диаграмма $i-\xi$ построена следующим образом. Кривая кипения жидкого раствора при постоянном давлении, выражающая графически зависимость энтальпии от концентрации, нанесена на рис. 6-14 в виде линии AC . Изобара сухого насыщенного пара, равновесного с

кипящим раствором, находится над изобарой кипящего раствора AC потому, что энтальпия пара больше энтальпии жидкости на величину теплоты парообразования. При концентрации жидкости ξ концентрация находящегося с ней в равновесии сухого насыщенного пара оказывается больше, и поэтому верхние точки изотермы сдвинуты вправо. Это вытекает из закона Коновалова, гласящего, что концентрация данного компонента в паровой фазе больше концентрации его в жидкой фазе в том случае, если добавление компонента увеличивает давление смеси.

Область, заключенная между кривыми кипения и конденсации, представляет область влажного пара. Ниже линии кипения проходят изотермы жидкого раствора. При этом система изотерм жидкого раствора остается общей для всех давлений вследствие того, что теплоемкость, а следовательно, и энтальпия практически не зависят от давления. Для определения же изотерм влажного пара при различных давлениях необходимо исходить из полной $i-\xi$ -диаграммы Бошняковича, на которой нанесены вспомогательные кривые (рис. 6-15). Так, например, для определения изотермы влажного пара, соответствующей состоянию жидкости в точке 1, проводят вертикаль до пересечения со вспомогательной кривой и затем, проведя линию параллельно оси абсцисс до пересечения с соответствующей изобарой сухого насыщенного пара, получают точку 2. Луч 1—2 и является искомой изотермой. Еще проще можно определить равновесную концентрацию пара с помощью вспомогательных кривых, нанесенных непосредственно на семействе изобар жидкости.

Простейший цикл абсорбционной холодильной установки (без теплообменника и ректификатора) в $i-\xi$ -диаграмме показан на рис. 6-16. На диаграмме нанесены

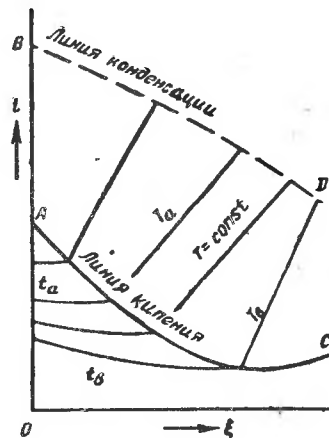


Рис. 6-14. $i-\xi$ -диаграмма для расчета абсорбционных холодильных установок.

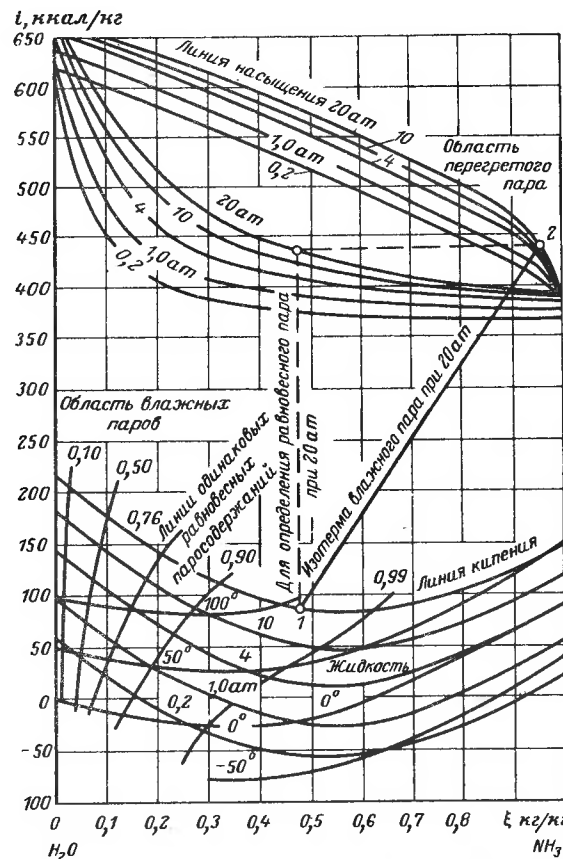


Рис. 6-15. i — ξ -диаграмма Бошняковича для обеих фаз водоаммиачного раствора.

изобары p_k и p_0 . Высшая температура кипения в генераторе t_2 определяется температурой греющего источника t_h . При этом необходимо учесть перепад температур, необходимый для передачи тепла от греющего источника раствору в генераторе. Обычно он составляет 6—8 град. Наинизшая температура крепкого раствора, уходящего из абсорбера (t_4), зависит от температуры охлаждающей воды. По давлению и наинизшей температуре абсорбции определяют концентрацию крепкого раствора ξ_k .

Линия 4—1 (вследствие крайне незначительной работы насоса точки 4 и 1 практически совпадают) харак-

теризует сжатие смеси в насосе от давления p_0 (точка 4) до давления p_k (точка 1). Таким образом, точка 1 определяет начало процесса в генераторе, а линия 1—1° — подогрев жидкости при концентрации ξ_k и давлении p_k до состояния насыщения (точка 1°). Линия 1°—2 описывает процесс кипения в генераторе, заканчивающийся при температуре t_2 .

Точка 3 совпадает с точкой 2, так как она определяет состояние раствора после дросселирования в РВ-I. Однако после дросселирования жидкость находится в виде эмульсии пар — жидкость. При этом состояние жидкости определяется точкой 3°, а состояние пара точкой 3'. Смесь с состоянием точки 3 попадает в абсорбер. Линия 3°—4 отражает процесс поглощения паров из испарителя.

Далее имеем:

1' — состояние паров, равновесных раствору в начале процесса в генераторе;

2' — то же в конце процесса в генераторе;

5 — состояние паров, уходящих из генератора, причем это состояние зависит от степени саморектификации паров в самом генераторе, определяемой его конструктивными особенностями;

5—6 — процесс конденсации при $p_k = \text{const}$ и $\xi_d = \text{const}$;

6—7 — процесс дросселирования в РВ-II до давления p_0 ; после дросселирования состояние смеси определяется по пару точкой 7' и по жидкости точкой 7°;

7—8 — процесс кипения в испарителе при температурах от t_7 до t_8 , которая определяется точкой пересече-

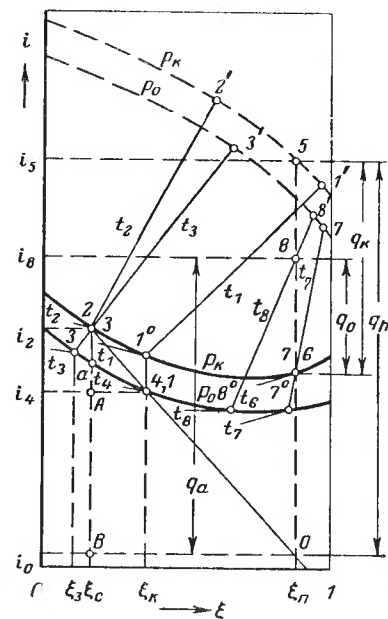


Рис. 6-16. Процесс абсорбционной холодильной установки в i — ξ -диаграмме.

чения линии ξ_{Π} с изотермой t_8 (точка 8). При этом $t_8 > t_7$.

Как было отмечено, при установке ректификатора ξ_{Π} близка к единице; в этих условиях изотермы $7^{\circ}7'$ и $8^{\circ}8'$ сливаются и становятся практически перпендикулярными к оси абсцисс.

6-9. РАБОЧИЕ СХЕМЫ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На основании теплового баланса абсорбционной холодильной установки можно написать следующие уравнения.

1. Тепло q_h , подведенное в генератор и отнесенное к 1 кг паров, составит:

$$q_h = i_5 + (f - 1)i_2 - fi_4, \text{ ккал/кг}, \quad (6-22)$$

или

$$q_h = i_5 - i_2 + f(i_2 - i_4), \text{ ккал/кг}. \quad (6-23)$$

2. Тепло q_k , отведенное в конденсаторе:

$$q_k = i_5 - i_6, \text{ ккал/кг}. \quad (6-24)$$

3. Тепло q_0 , подведенное в испаритель (холодопроизводительность):

$$q_0 = i_8 - i_6, \text{ ккал/кг}. \quad (6-25)$$

4. Тепло q_a , отведенное в абсорбере:

$$q_a = i_8 - i_3(f - 1) - fi_4, \text{ ккал/кг}, \quad (6-26)$$

или

$$q_a = i_8 - i_3 + f(i_3 - i_4), \text{ ккал/кг}. \quad (6-27)$$

5. Тепловой эквивалент работы насоса q_p :

$$q_p = Tvf(p_k - p_0), \text{ ккал/кг}. \quad (6-28)$$

Удельный объем водоаммиачной смеси v можно найти в таблицах или по приближенной формуле

$$v = \frac{0,001}{1 - 0,35\xi}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (6-29)$$

В описанной схеме абсорбционной холодильной установки (см. рис. 6-11) не предусмотрен теплообменник жидкого раствора между генератором и абсорбером, устанавливаемый на всех действующих машинах непрерывного действия для повышения экономичности их работы. Действительно, если горячий раствор из генера-

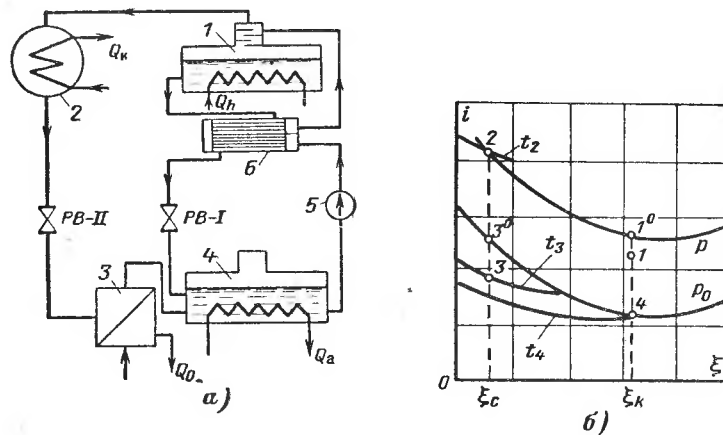


Рис. 6-17. Принцип регенеративного использования тепла в абсорбционной холодильной установке.

а — схема включения теплообменника; б — изменение состояния растворов в теплообменнике.

тора и холодный раствор из абсорбера заставить обмениваться теплом в противотоке, то температура крепкого холодного раствора приблизится к начальной температуре кипения в генераторе и уменьшится количество тепла, затрачиваемого извне. Слабый же горячий раствор поступит в абсорбер с температурой, близкой к температуре выходящего из него холодного крепкого раствора. Это в свою очередь уменьшит расход тепла (количество воды), отводимого в абсорбере. Схема включения теплообменника показана на рис. 6-17, а.

В теплообменник 6 входит $(f-1)$, кг, слабого раствора с температурой t_2 и f , кг, крепкого раствора с температурой t_4 . С учетом 5—10% потерь в окружающую среду передаваемое в теплообменнике количество тепла q_T составит:

$$q_T \approx 0,9(f - 1)(i_2 - i_3) = f(i_1 - i_4). \quad (6-30)$$

Изменение состояния раствора изображается на i — ξ -диаграмме вертикальными отрезками (рис. 6-17, б). Состояние крепкого раствора на выходе из теплообменника определяется точкой 1 с концентрацией ξ_k и эн-

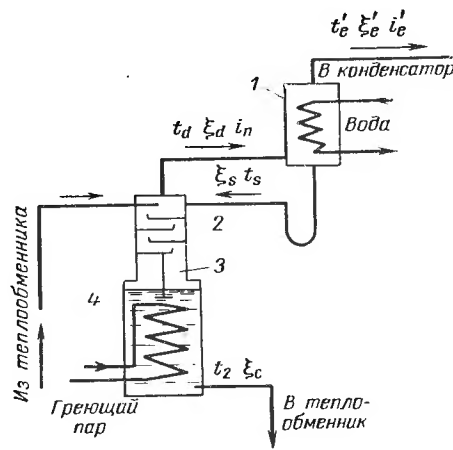


Рис. 6-18. Схема включения ректификатора в цикл абсорбционной холодильной установки.

1 — дефлегматор; 2 — флегма; 3 — ректификатор; 4 — генератор.

тальпией i_1 ; оно может быть найдено из зависимости

$$i_1 = \frac{q_r}{f} + i_4. \quad (6-31)$$

Включение в схему теплообменника уменьшает тепло, подаваемое в генератор извне, и тепло, отнимаемое в абсорбере охлаждающей водой, на величину q_r .

Низкая концентрация паров, выходящих из генератора, обуславливает попадание воды в конденсатор и, следовательно, в испаритель. Для повышения концентрации паров до $\xi \approx 1$ между генератором и конденсатором устанавливают, как отмечалось, ректификатор и дефлегматор. В некоторых конструкциях ректификация осуществляется в самом генераторе. Колонку ректификатора заполняют насадкой из колец или барботажными тарелками. Перегоняемой жидкостью служит крепкий раствор, поступающий из теплообменника. Так как достигнуть при этом значения ξ_n , равновесного ξ_k , практически невозможно и, следовательно, невозможно устранить попадание воды в конденсатор, для дальнейшего очищения паров ставят дефлегматор. Он охлаждается

либо водой, либо частью холодного крепкого раствора, отвечаемого на пути между насосом и теплообменником. На рис. 6-18 показана схема с охлаждением дефлегматора водой. Образующаяся «флегма» стекает обратно в генератор.

Обозначив через R весовое количество флегмы, отнесенное к 1 кг ректифицированных паров, получим следующий материальный баланс:

$$(1 + R) \xi_n = \xi'_e + R \xi_s, \quad (6-32)$$

откуда

$$R = \frac{\xi'_e - \xi_n}{\xi_n - \xi_s}. \quad (6-33)$$

Обычно принимают $\xi_s \approx \xi_k$, хотя в действительности концентрация флегмы зависит от конструкции дефлегматора.

Теплоту ректификации q_R определяют из теплового баланса:

$$(1 + R) i_n = q_R + i'_e + R i_s,$$

откуда

$$q_R = (1 + R) i_n - i'_e - R i_s. \quad (6-34)$$

При наличии дефлегматора тепло, подаваемое в генератор, определяется следующим образом.

Из генератора выходит:

$(1 + R)$, кг, пара с энтальпией i_n ;
 $(f - 1)$, кг, раствора с энтальпией i_2 .

В генератор входит:

f , кг, раствора с энтальпией i_1 (в случае ректификации частью холодного раствора $f - f'$);

R , кг, флегмы с энтальпией i_s (в случае ректификации частью раствора $- R + f'$).

В таком случае при охлаждении дефлегматора водой

$$q_h = (1 + R) i_n - i_2 + f(i_2 - i_1) - R i_s \quad (6-35)$$

или

$$q_h = i_n - i_2 + f(i_2 - i_1) + R(i_n - i_s). \quad (6-36)$$

Из выражений (6-34) и (6-35) находим:

$$q_h = i'_e - i_2 + f(i_2 - i_1) + q_R. \quad (6-37)$$

Охлаждение водой выгодно, если вода может быть использована для технологических нужд; в противном

случае целесообразно охлаждать дефлегматор частью холодного крепкого раствора, отбираемого между насосом и теплообменником, так как при этом тепловые коэффициенты будут более высокими.

В целях достижения наиболее высокого теплового коэффициента иногда прибегают к схеме с развитой регенерацией тепла, выгодной главным образом при низких температурах (ниже -25°) [Л. 10, 74].

К важнейшим отклонениям в балансе тепла реальных процессов от теоретических следует отнести:

а) потери во внешнюю среду (генератор, теплообменник);

б) потери, вызванные неравномерностью паров, покидающих ректификактор;

в) потери вследствие ограниченности контакта между парами и раствором, приводящие к тому, что в конце абсорбции раствор несколько переохлажден, так как его концентрация ниже равновесной при данной температуре.

При расчете установки эти потери оцениваются обычно введением общего коэффициента внешних потерь тепла, принимаемого равным 0,9—0,8.

6-10. АППАРАТЫ АБСОРБЦИОННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Конденсаторы

В абсорбционных холодильных установках применяют конденсаторы: кожухотрубчатые (горизонтальные и вертикальные), кожухомеевиковые, элементные, оросительные, листотрубные и других конструкций.

Кожухотрубчатый конденсатор показан на рис. 6-19, а. Отвод паровоздушной смеси из кожуха производят сверху, из места, наиболее удаленного от ввода пара. Конденсатор снабжен предохранительным клапаном диаметром не менее 15 мм.

Аммиачные элементные конденсаторы (рис. 6-19, б) применяются в средних и крупных холодильных установках. Они состоят из однотипных элементов, соединенных в батарею. Каждый элемент представляет собой как бы горизонтальный кожухотрубчатый конденсатор диаметром 250 мм с малым числом труб, обычно 14, диаметром 38 мм. Каждая секция снабжена ресивером, в верхней части которого имеется отвод паровоздушной смеси. Ресиверы соединены коллекторами. Аммиачный пар проходит последовательно все элементы сверху вниз или подается во все элементы параллельно.

Оросительные конденсаторы применяются в установках средней производительности. Конденсатор (рис. 6-19, в) вы-

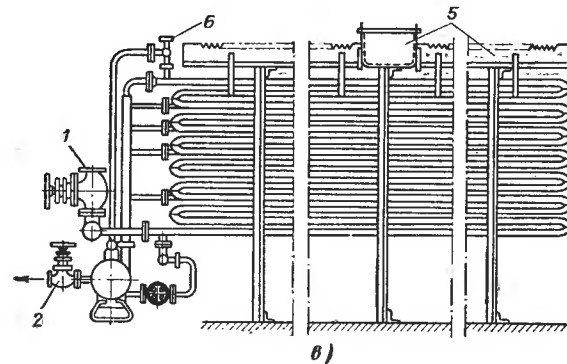
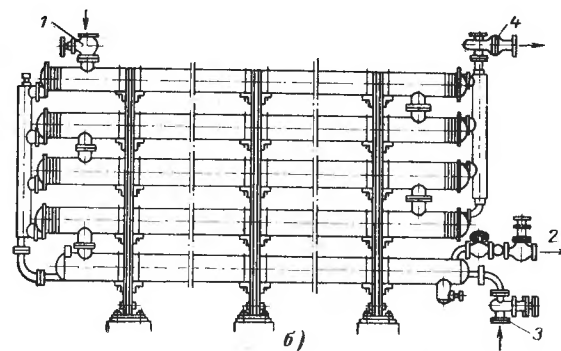
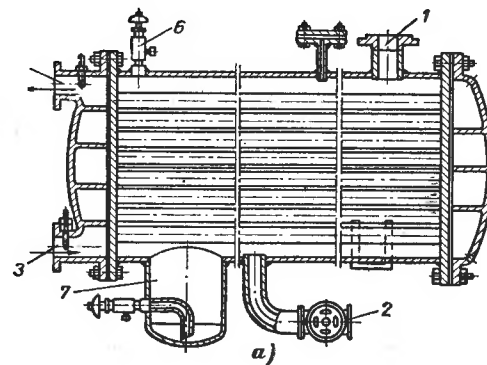


Рис. 6-19. Аммиачные конденсаторы.

а — кожухотрубчатый; б — элементный; в — оросительный;
1 — вход пара; 2 — выход жидкости; 3 — вход воды; 4 — выход воды; 5 — водораспределительный желоб; 6 — воздухоотделитель; 7 — дренаж.

Таблица 6-1

Коэффициент β для расчета теплоотдачи по формуле (6-38)

Число рядов	Пучок Жик-наба	Ромбический пучок	Коридорный пучок	Число рядов	Пучок Жик-наба	Ромбический пучок	Коридорный пучок
1	1	1	1	9	0,902	0,69	0,585
2	0,98	1	0,85	10	0,900	0,67	0,570
3	0,96	0,9	0,77	11	0,898	0,65	0,555
4	0,94	0,83	0,715	12	0,895	0,63	0,530
5	0,93	0,78	0,680	13	0,892	0,615	0,510
6	0,92	0,76	0,650	14	0,890	0,605	0,490
7	0,91	0,74	0,615	15	0,888	0,600	0,475
8	0,905	0,71	0,600	16	0,886	0,590	0,460

полнен в виде змеевика, состоящего по высоте из 12—14 труб диаметром 38—50 мм. Над змеевиками установлен водораспределительный бак с желобами. Хладагент вводится в нижнюю трубу каждой секции. Для повышения коэффициента теплопередачи между аммиаком и водой образующийся конденсат отводится в нескольких местах по высоте аппарата и поступает в ресивер. Между ресивером и верхней трубой помещается уравнивательная трубка, способствующая улучшению стока жидкости в ресивер. Поверхность выпускаемых оросительных конденсаторов составляет 30—90 м², число секций — от двух до шести.

Коэффициент теплоотдачи α в аммиачных конденсаторах на стороне паров конденсирующегося аммиака можно определить по формуле

$$\alpha = 0,725\beta A \left[\frac{r}{(t_k - t_{ст}) d} \right] \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}, \quad (6-38)$$

где β — коэффициент, зависящий от расположения труб в пучке (табл. 6-1).

Ниже приведены значения коэффициента A в зависимости от температуры конденсации t_k :

$t_k, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	25	30
A	1500	1480	1470	1460	1465	1475	1485

Расчет теплоотдачи на стороне охлаждающей воды и коэффициента теплопередачи производят по обычным формулам теплопередачи, применяемым в расчете процессов, рассматриваемых в конкретных условиях.

Испарители

В испарителе тепло передается от хладоносителя (рассола, воды) или от охлаждаемой среды холодильной камеры кипящему холодильному агенту. Охлажденный хладагент перекачивается из испарителя насосом к месту потребления холода.

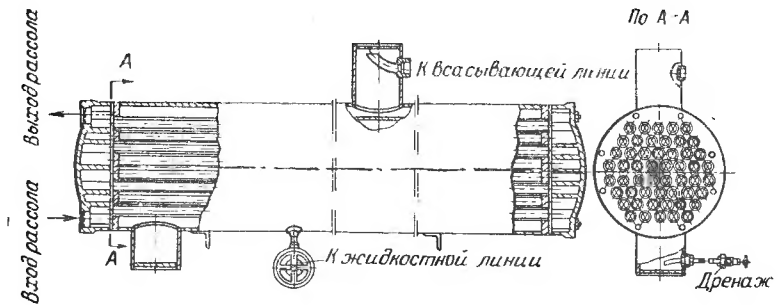


Рис. 6-20. Аммиачный кожухотрубчатый испаритель.

Кожухотрубчатый испаритель (рис. 6-20) представляет собой горизонтально расположенный цилиндрический сосуд длиной до 5 м с трубами диаметром 38—50 мм, ввальцованными в трубные решетки. По трубам протекает рассол. Хладагент подается в межтрубное пространство через штуцер, приваренный в нижней части кожуха. Для создания большой скорости движения рассола испарители выполняют многоходовыми. В верхней части испарителя приварен отделитель жидкости.

Особенностью работы испарителя абсорбционных холодильных машин является необходимость удаления из него остатка воды, накапливающегося в виде флегмы (5 г воды на 1 кг поступающего аммиака). Процесс дренажирования испарителя нарушает режим работы установки, а при несудачном выполнении может полностью остановить ее работу. Кроме того, с водой теряется значительное количество аммиака.

Коэффициент теплоотдачи со стороны рассола при движении его внутри труб определяют по формуле Ульзамера [Л. 10]:

$$\alpha = 489 (1 + 0,007t) [1 - 1,1 (\gamma_s - 1)] \frac{w^{0,5}}{d^{0,5}}, \quad \text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-39)$$

где γ_s — удельный вес рассола, кг/л.

При кипении в большом объеме коэффициент теплоотдачи от стенки к аммиаку находят по формуле

$$\alpha = A q^{0,706}, \quad \text{ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-40)$$

где коэффициент A имеет значения:

Температура кипения, $^\circ\text{C}$	—10	—20	—30	—40
A	5,95	5,92	5,91	5,84

Абсорберы

По принципу действия абсорберы разделяются на пленочные и барботажные. В пленочных абсорберах слабый раствор стекает по охлаждающей поверхности, абсорбирует пары аммиака. Охлаждающая поверхность барботажных абсорберов полностью залита раствором, пары аммиака подаются под раствор и, барботируя, абсорбируются в нем. В последние годы сконструирован и испытан комбинированный барботажно-пленочный абсорбер.

Элементный пленочный абсорбер (рис. 6-21, а) собирают из кожухотрубчатых элементов, располагая их один над другим. Каждый элемент снабжен своим оросительным корытом. Слабый раствор подается в верхний элемент, орошая последовательно трубы остальных элементов, становится крепким и стекает в ресивер. Пары аммиака поступают в элементы через специальные коллекторы. Охлаждающая вода подается в трубу ресивера крепкого раствора, движется последовательно по трубам всех элементов и нагретой выходит из верхнего элемента. Большое число фланцевых соединений элементного абсорбера вызывает нарушение герметичности аппарата; аппарат очень чувствителен к загрязнениям, забивающим отверстия в оросительных корытах.

Горизонтальный барботажный кожухотрубчатый абсорбер (рис. 6-21, б) представляет собой кожух с трубными решетками и выпуклыми крышками, усложненными перегородками для создания ходов воды по аппарату. В нижней части обечайки установлены барботеры. Слабый раствор подводится к верхней части аппарата и заполняет его на 75—85% высоты. Крепкий раствор отводится снизу. Аппарат нечувствителен к механическим загрязнениям. Поверхность контакта жидкой и паровой фаз в нем относительно мала, и поэтому он громоздок и требует большого количества аммиака для зарядки.

Барботажно-пленочный абсорбер (рис. 6-21, в) представляет собой кожух, в концы которого вварены трубные решетки. Оросительный короб, приваренный к трубным решеткам, разделяет теплопередающую поверхность на две части. Трубы, находящиеся между корпусом и коробом, работают, как в барботажном аппарате, а расположенные внутри короба — как в пленочном. По всей длине короба просверлены отверстия, через которые раствор стекает на трубы. Слабый раствор подается сначала на барботеры, приваренные к боковым стенкам короба, а затем поступает в пленочную часть. Крепкий раствор сливается в ресивер. Пары аммиака подаются в барботеры снизу, частично поглощаются при барботаже и поступают в пленочную часть аппарата, где полностью абсорбируются раствором. Число оросительных отверстий и их диаметр рассчитывают так, чтобы уровень раствора над коробом был 20—30 мм. Высота парового пространства должна быть минимальной — 0,9—0,95 диаметра корпуса.

Показатели работы и габариты барботажно-пленочного абсорбера в технико-экономическом отношении существенно выше, чем у пленочных и барботажных аппаратов.

Расчет теплопередачи в абсорберах ведут по общепринятым формулам. Коэффициент теплоотдачи от стен-

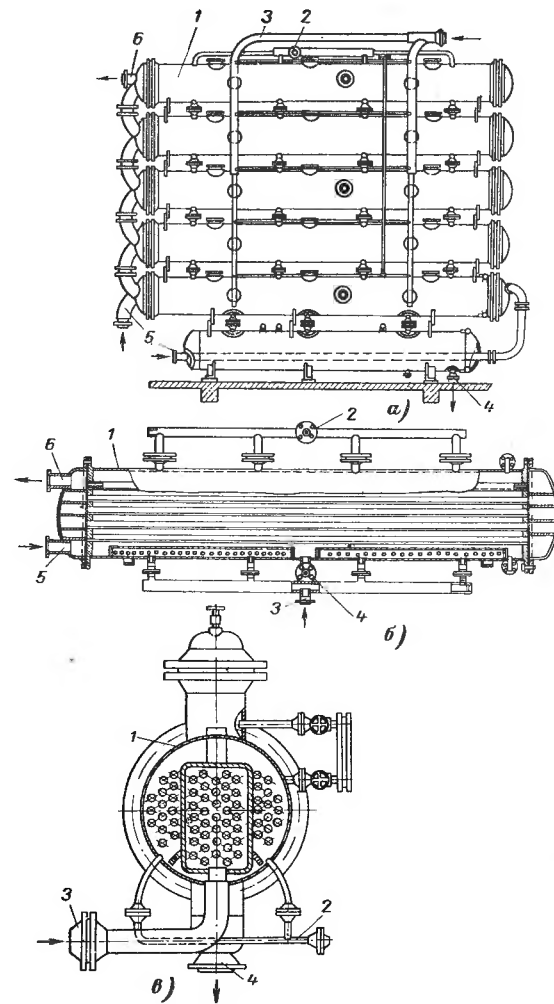


Рис. 6-21. Аммиачные абсорберы.

а — элементный пленочный; б — барботажный кожухотрубчатый; в — барботажно-пленочный; 1 — корпус; 2 — коллектор слабого раствора; 3 — вход аммиачных паров; 4 — выход крепкого раствора; 5 — вход воды; 6 — выход воды.

ки к воде, протекающей в трубах,

$$\alpha = 1780 \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}. \quad (6-41)$$

В абсорберах, в которых охлаждающая вода стекает по поверхности пленкой, коэффициент теплоотдачи определяют по формулам:

при орошении горизонтальных труб

$$\alpha = K \frac{G_n^{0,39}}{d^{0,61}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-42)$$

где G_n — плотность орошения, $\text{кг/м} \cdot \text{ч}$; K — константа: $K=655$ при $d=1''$, $K=815$ при $d=(2-4)''$; при орошении вертикальных труб — по формуле Сексавера: для воды при $t_n=(0-40)^\circ\text{C}$, стальные трубы:

$$\alpha_w = 2300 G_n^{0,5} H^{-0,05} (1 + 0,01442 \theta), \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-43)$$

медные трубы:

$$\alpha_w = 3160 G_n^{0,5} H^{-0,05} (1 + 0,01442 \theta), \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-44)$$

где G_n — плотность орошения труб (по сумме окружностей всех труб), $\text{кг/м} \cdot \text{ч}$; H — высота трубы, м ; $\theta = t_{\text{ст}} - t_w$ — разность между температурами стенки и воды, град .

Теплоотдачу на стороне абсорбирующего раствора определить значительно труднее. Здесь теплообмен определяется плотностью орошения, степенью смачиваемости, качеством поверхности, дисперсионностью барботажа и другими факторами. Этот вопрос подробно рассматривается в специальной литературе [Л. 10]. По номограмме (рис. 6-22) можно определить α от раствора к стенке трубы пленочного абсорбера с вертикальными трубами. Теоретические и экспериментальные значения α при пленочном стекании раствора по горизонтальной трубе не определены.

Для барботажных абсорберов коэффициент теплоотдачи от раствора к стенке трубы зависит от удельной тепловой нагрузки q . Известна следующая зависимость [Л. 10, стр. 208]:

$$\alpha = 21,2 q^{0,425}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}, \quad (6-45)$$

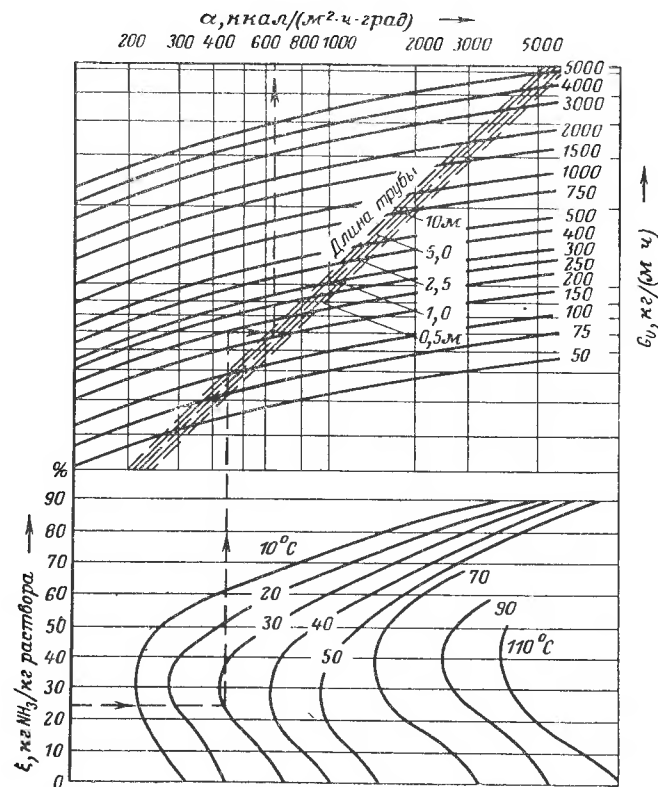


Рис. 6-22. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи от раствора к стенке пленочного абсорбера с вертикальными трубами. Пунктиром показан пример:

$\xi = 25\%$, $t = 30^\circ\text{C}$; $G_n = 200 \text{ кг/м} \cdot \text{ч}$, длина трубы 5 м , $\alpha = 630 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

при этом величина q изменялась от 1500 до $20000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$.

По данным ВНИИХИ для барботажно-пленочного абсорбера получены следующие значения коэффициентов теплопередачи между раствором и водой [Л. 10]:

$G_n, \text{ л/м} \cdot \text{ч}$	130	140	150	180
$k, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$	320	325	335	390

Поверхность теплообмена исследованного аппарата составляла $22,5 \text{ м}^2$ (67 труб диаметром $38 \times 3 \text{ мм}$, длиной 3400 мм), причем в бар-

ботажной части находилось 30 труб, в пленочной — 37. Скорость воды — 0,45 м/сек. Концентрация слабого раствора составляла 0,22—0,25 кг/кг, крепкого 0,27—0,3 кг/кг.

Генераторы

Генераторы (кипятильники), очень разнообразны по конструкции: кожухотрубчатые (вертикальные и горизонтальные), элементные, двухтрубные, кожухозмеевиковые; по принципу действия — пленочные и затопленные.

Вертикальный кожухотрубчатый пленочный генератор, обогреваемый паром, показан на рис. 6-23, а. Он состоит из сборника слабого раствора, греющей поверхности и ректификационной колонны. Греющие вертикальные трубы снабжены направляющими колпачками, служащими для образования пленки раствора. Ректификационная колонна снабжена определенным расчетным числом тарелок и насадкой из колец Рашига. Крепкий раствор подается на насадку, сливается на верхнюю трубную решетку, а затем через направляющие колпачки стекает в виде пленки по внутренней поверхности труб. Слабый раствор сливается в сборник и отводится в теплообменник растворов. Ректификация аммиачных паров происходит сначала в кипятильных трубах стекающим кипящим раствором, затем на насадке — крепким раствором и далее на ректификационных тарелках — стекающей из дефлегматора холодной флегмой.

Вертикальные пленочные генераторы отличаются высокими коэффициентами тепло- и массообмена, компактностью, малой металлоемкостью и быстротой ввода аппарата в работу. Неудобства в работе вызывают частые засорения каналов направляющих колпачков и трудность замены труб. Аппараты удобны как при малой, так и при большой производительности холодильной установки.

Горизонтальный кожухотрубчатый затопленный генератор (рис. 6-23, б) представляет собой трубчатку с двумя трубными решетками, жестко соединенную с кожухом. В трубном пучке конденсируется греющий пар, а в межтрубном пространстве кипит водоаммиачный раствор. К горизонтально расположенной обечайке прикреплен вертикально ректификатор с распределительным устройством и насадкой. В распределительном устройстве, выполненном в виде пучка труб, осуществляется начальная ректификация аммиачных паров. Последующая ректификация происходит на кольцевой насадке холодной флегмой, стекающей из дефлегматора. Аппарат мало загрязняется и легко поддается очистке; смена труб затруднений не вызывает. Однако теплообмен в аппарате недостаточно интенсивен, что приводит к увеличению расхода металла, громоздкости, а также к большой инерционности режимов работы. Горизонтальные кожухотрубчатые генераторы нашли применение в маломощных холодильных машинах (до 100 тыс. ккал/ч).

Генераторы горизонтальные с газовым обогревом целесообразно применять в мощных абсорбционных холодильных установках на предприятиях, где имеются вторичные энергоресурсы в виде горячих газов или смеси технологических газов с парами воды, которые необходимо разделить. В межтрубном пространстве такого кожухотрубчатого аппарата (рис. 6-23, в) кипит водоаммиачный раствор, в трубах проходят горячие газы. Ректификационная колонна над ге-

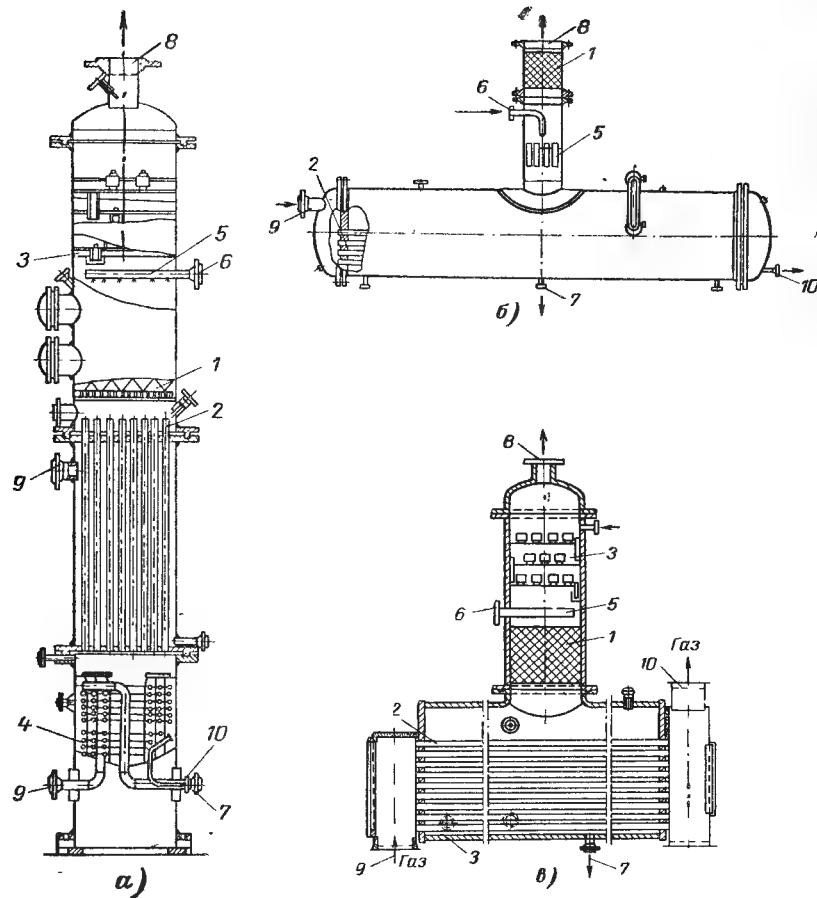


Рис. 6-23. Конструкции генераторов-кипятильников.

а — вертикальный кожухотрубчатый пленочный; б — горизонтальный кожухотрубчатый затопленный; в — горизонтальный с газовым обогревом; 1 — насадка из колец; 2 — кипятильные трубы; 3 — ректификационные тарелки; 4 — добавочный греющий змеевик; 5 — распределительное устройство; 6 — вход крепкого раствора; 7 — выход слабого раствора; 8 — выход паров аммиака; 9 — вход греющего теплоносителя; 10 — выход конденсата (газа).

нератором заполняется обычно барботажными тарелками с колпачками и насадкой из колец Рашига.

Коэффициент теплоотдачи от стенки горизонтальной трубы к кипящему водоаммиачному раствору можно найти по номограмме рис. 6-24 [Л. 10]. В ней значения α

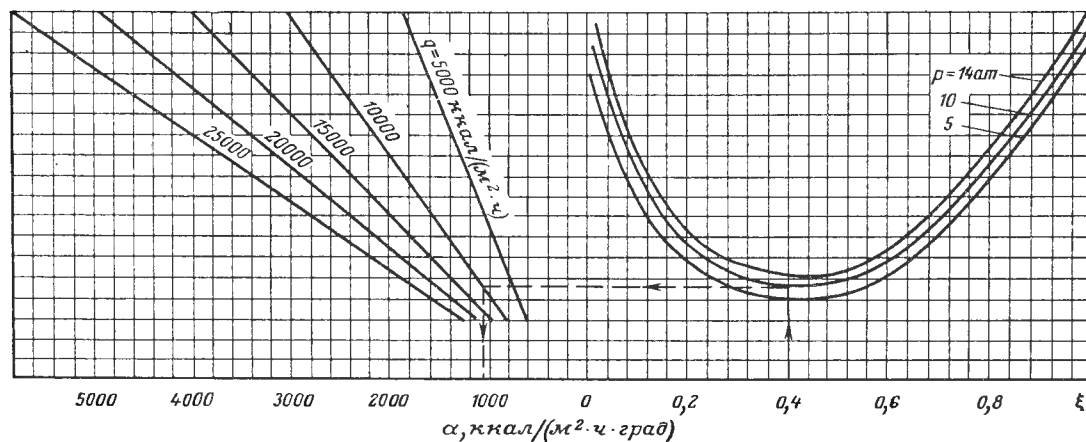


Рис. 6-24. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи при кипении водоаммиачного раствора на горизонтальных трубах. Пунктиром показан пример:

$\xi = 0,4 \text{ кг/кг}$, $p = 10 \text{ ат}$, $q = 10 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$; $\alpha = 1050 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

даны в пределах изменения концентраций, давлений и удельных тепловых нагрузок.

На рис. 6-25 приведена номограмма для определения коэффициента теплоотдачи при кипении водоаммиачного раствора, стекающего по внутренней поверхности вертикальных труб. Эксперимент был проведен на генераторе с трубами диаметром 50 мм, длиной 1800—2500 мм; давление выпаривания изменялось от 8 до 14 ат, греющего пара — от 1 до 4 ат.

Ректификация и устройство генераторов абсорбционных холодильных машин необходимо проектировать по правилам и формулам гл. 5 или на основании данных специальной литературы.

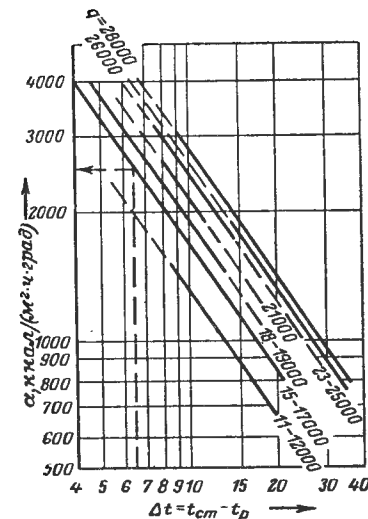


Рис. 6-25. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи при кипении водоаммиачного раствора, стекающего по внутренней поверхности вертикальных труб. Пример: $\Delta t = t_{\text{ст}} - t_p = 6,5^\circ \text{C}$, $q = 15 \cdot 10^3 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}$, $\alpha = 2500 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Теплообменники и переохладители

Теплообменники и переохладители абсорбционных холодильных установок выполняют двухтрубными при малых и средних мощностях холодильных машин и элементными или кожухотрубчатыми при больших мощностях.

Для уменьшения тепловых потерь и получения больших скоростей горячий слабый раствор направляют из генератора по внутренним трубам, а крепкий из абсорбера — по межтрубному пространству теплообменника. При малых кратностях циркуляции возможно закипание крепкого раствора, и поэтому его подводят к нижним элементам, отводя из верхних (для совпадения движения раствора и паровых пузырей).

В установках, где дефлегмация паров аммиака производится крепким холодным раствором, не удастся значительно переохладить слабый раствор в теплообменнике, вследствие чего увеличивается тепловая нагрузка абсорбера. В этом случае применяют водяной переохладитель слабого раствора, в результате чего улучшается процесс абсорбции и уменьшается металлоемкость установки (коэффи-

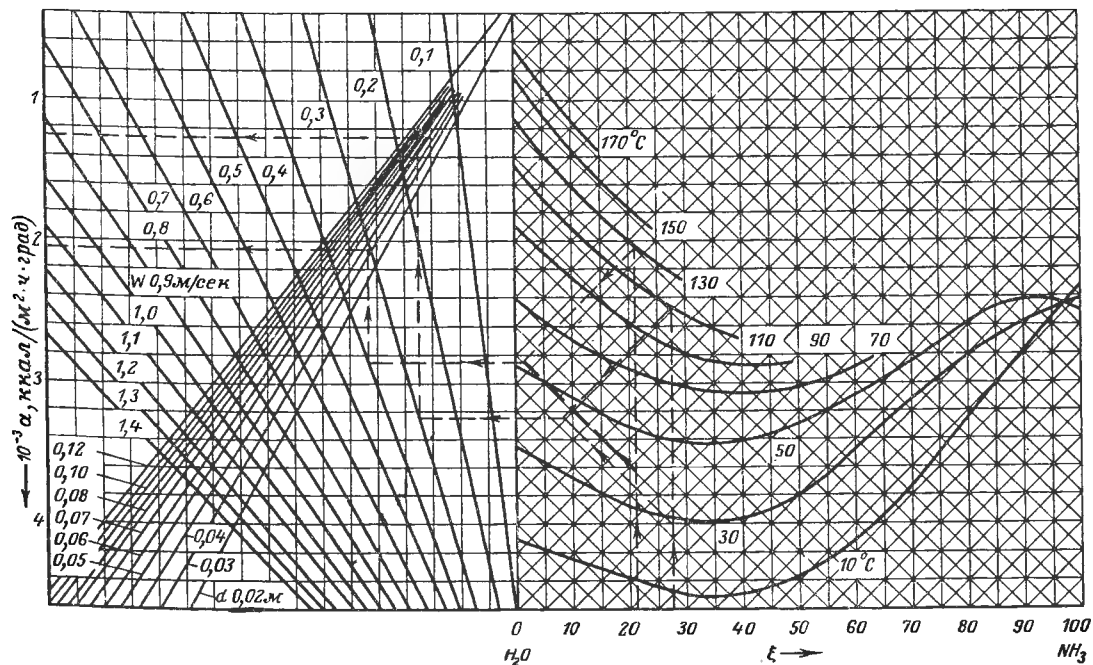


Рис. 6-26. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи со стороны слабого и крепкого растворов.

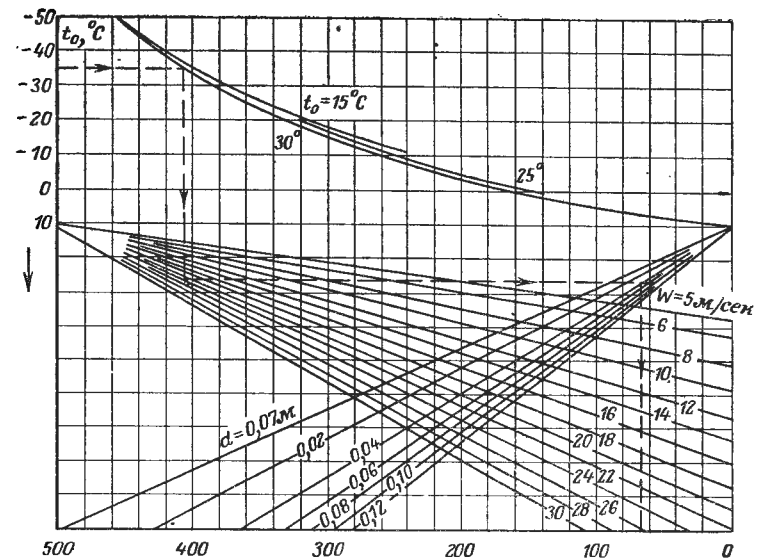


Рис. 6-27. Номограмма для определения коэффициента теплоотдачи от стенки к парам аммиака. Пример: $t_o = -35^\circ\text{C}$, $w = 20$ м/сек, эквивалентный диаметр 0,04 м, $\alpha = 63 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$.

коэффициент теплопередачи в переохладителе значительно выше, чем в абсорбере). Водяные переохладители крепкого раствора применяют в тех случаях, когда возможно его вскипание, в результате чего нарушается режим работы водоаммиачного насоса и всей установки. Паровые переохладители служат для переохлаждения жидкого аммиака холодным паром, выходящим из испарителя.

Все отмеченные переохладители конструируют элементарными или двухтрубными.

Для определения коэффициента теплоотдачи в жидкостных теплообменниках и переохладителях со стороны слабого и крепкого водоаммиачных растворов можно пользоваться номограммой Нибергала, приведенной на рис. 6-26 [Л. 7, стр. 213]. Зная начальные и конечные температуры, концентрации, эквивалентные диаметры и скорости, можно найти по номограмме коэффициенты теплоотдачи со стороны слабого и крепкого растворов.

Для определения коэффициентов теплоотдачи α в паровом переохладителе пользуются следующими формулами:

на стороне жидкого аммиака при температурах от -20 до $+30^\circ\text{C}$

$$\alpha = 1890 \frac{w^{0,8}}{d^{0,2}}, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}; \quad (6-46)$$

на стороны паров аммиака при продольном обтекании труб

$$\text{Nu} = 0,027 \text{Re}^{0,78}. \quad (6-47)$$

Коэффициент теплоотдачи на стороне паров аммиака можно определить также по номограмме рис. 6-27.

6-11. ПРИМЕР РАСЧЕТА АБСОРБЦИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Рассчитать абсорбционную холодильную установку для условий [Л. 28]:

$Q_0 = 30\,000 \text{ ккал/ч}$;

температура охлаждающей воды $t_w = +22^\circ\text{C}$;

температура греющего пара $t_n = 119,6^\circ\text{C}$ ($p_0 = 2 \text{ ат}$);

средняя температура рассола $t_p = -7^\circ\text{C}$;

охлаждение дефлегматора водой.

Принимаем давление конденсации $p_k = 12 \text{ ат}$. Соответствующая температура конденсации при $\xi'_c \approx 1$ $t_k = +30^\circ\text{C}$. Энтальпия ректифицированных паров аммиака $i'_c = 389 \text{ ккал/кг}$. Принимаем температуру испарения аммиака $t_0 = -20^\circ\text{C}$. Давление, соответствующее кипению, $p_0 = 2,0 \text{ ат}$. Принимаем наименьшую температуру раствора в процессе абсорбции $t_4 = +30^\circ\text{C}$. Концентрация крепкого раствора $\xi_k = 0,387 \text{ кг/кг}$. Соответствующая энтальпия крепкого раствора $i'_4 = 4 \text{ ккал/кг}$. Принимаем наивысшую температуру раствора в генераторе $t_2 = +110^\circ\text{C}$. Соответствующая концентрация слабого раствора $\xi_c = 0,298 \text{ кг/кг}$. Соответствующая энтальпия слабого раствора $i'_2 = 91 \text{ ккал/кг}$.

Кратность циркуляции крепкого раствора

$$f = \frac{\xi'_c - \xi_c}{\xi_k - \xi_c} = \frac{1 - 0,298}{0,387 - 0,298} = 7,9 \text{ кг/кг}.$$

Энтальпия жидкого аммиака после конденсатора $i'_6 = 118 \text{ ккал/кг}$.

Энтальпия паров аммиака после испарителя $i_8 = 378 \text{ ккал/кг}$.

Принимаем температуру слабого раствора после теплообменника $t_3 = 240^\circ\text{C}$. Соответствующая энтальпия слабого раствора $i_3 = 14 \text{ ккал/кг}$.

Определяем тепло q_τ , отдаваемое слабым раствором в теплообменнике:

$$q_\tau = (f - 1)(i_2 - i_3) - (7,9 - 1)(91 - 14) = 530 \text{ ккал/кг}.$$

Принимаем 10% потерь тепла в окружающую среду:

$$\Delta q_\tau = 0,1 q_\tau = 53 \text{ ккал/кг}.$$

Тепло, воспринятое крепким раствором в теплообменнике,

$$q'_\tau = 530 - 53 = 477 \text{ ккал/кг}.$$

Энтальпия крепкого раствора после теплообменника

$$i_1 = \frac{q'_\tau}{f} + i_4 = \frac{477}{7,9} + 4 = 64,5 \text{ ккал/кг}.$$

Соответствующая температура крепкого раствора (по i - ξ диаграмме) $t_1 = +80^\circ\text{C}$.

Тепло, отнимаемое в абсорбере,

$$q_a = i_8 - i_3 + f(i_3 - i_4) = 378 - 14 + 7,9(14 - 4) = 443 \text{ ккал/кг}.$$

Тепло, отнимаемое в конденсаторе,

$$q_k = i'_c - i_6 = 389 - 118 = 271 \text{ ккал/кг}.$$

Холодопроизводительность 1 кг аммиака

$$q_0 = i_8 - i_6 = 378 - 118 = 260 \text{ ккал/кг}.$$

Тепло, отнимаемое в ректификаторе (графически), $q_R = 90 \text{ ккал/кг}$.

Температуру паров перед ректификатором принимаем $t_n = 93^\circ\text{C}$.

Тепло, отнимаемое в генераторе,

$$q_h = i'_c - i_2 + f(i_2 - i_1) + q_R = 389 - 91 + 7,9(91 - 64,5) + 90 = 597 \text{ ккал/кг}.$$

Тепловой баланс установки:

Приход тепла	Расход тепла
$q_h = 597 \text{ ккал/кг}$	$q_a = 443 \text{ ккал/кг}$
$q_0 = 260 \text{ ккал/кг}$	$q_k = 271 \text{ ккал/кг}$
	$q_R = 90 \text{ ккал/кг}$
	$\Delta q_\tau = 53 \text{ ккал/кг}$
Всего 857 ккал/кг	Всего 857 ккал/кг

Тепловой коэффициент

$$\epsilon_a = \frac{q_p}{q_h} = \frac{260}{597} = 0,43.$$

Часовое количество циркулирующего аммиака (с учетом внешних потерь в 15%)

$$G_A = \frac{Q_0}{q_0 \cdot 0,85} = \frac{30\,000}{260 \cdot 0,85} = 136 \text{ кг/ч}.$$

Часовое количество сухого насыщенного греющего водяного пара

$$G_h = \frac{q_h G_A}{r} = \frac{597 \cdot 136}{500} = 163 \text{ кг/ч}.$$

Удельный объем крепкого раствора

$$v_k = \frac{1}{1 - 0,35\xi_k} = \frac{1}{1 - 0,35 \cdot 0,387} = 1,16 \text{ л/кг.}$$

Часовой объем крепкого раствора

$$V_k = G_A f v_k = 136 \cdot 7,9 \cdot 1,16 = 1250 \text{ л/ч.}$$

Удельный объем слабого раствора

$$v_c = \frac{1}{1 - 0,35 \cdot 0,298} = 1,12 \text{ л/кг.}$$

Часовой объем слабого раствора

$$V_c = G_A (f - 1) v_c = 136 (7,9 - 1) 1,12 = 1050 \text{ л/ч.}$$

После определения параметров хладагента и теплоносителя во всех аппаратах установки необходимо провести тепловой и конструктивный расчеты абсорбера, генератора с ректификатором и дефлегматором, конденсатора и испарителя, а также всех теплообменников и переохладителей. Методика расчета перечисленных аппаратов приведена в соответствующих главах книги.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие источники энергии могут служить основой получения холода?
2. На каких принципах основана работа компрессионной, абсорбционной и парожекторной холодильных установок?
3. Какими величинами характеризуется работа компрессионной, абсорбционной и парожекторной установок?
4. Нарисуйте и объясните схемы парожекторной холодильной установки с поверхностными и смесительными конденсаторами. Назовите их достоинства и недостатки.
5. Изобразите теоретический и действительный циклы парожекторной холодильной установки в $T-s$ -диаграмме.
6. Как определяется расход пара низкого давления, образующегося в испарителе?
7. Как влияет унос капель на производительность парожекторной холодильной установки?
8. Составьте схему конструкции горизонтального испарителя парожекторной установки.
9. Опишите конструктивные особенности главного и вспомогательных эжекторов парожекторной установки.
10. Как определяют конструктивные размеры сопла и диффузора струйных эжекторов?
11. Напишите выражение для кратности охлаждения в конденсаторе.
12. Дайте сравнительную оценку поверхностных и смесительных конденсаторов парожекторных установок.
13. Составьте принципиальную схему абсорбционной холодильной установки непрерывного действия и объясните назначение каждого ее элемента.
14. Объясните принцип работы абсорбционной установки периодического действия.
15. Как определяется величина теплового коэффициента абсор-

бционной машины через тепловые нагрузки и температуры в аппаратах?

16. Выразите кратность циркуляции раствора в абсорбционной установке.

17. Изобразите принципиальный процесс абсорбционной установки в $T-s$ - и $i-x$ -диаграммах.

18. Каково назначение промежуточного теплообменника и ректификатора в схеме абсорбционной установки?

19. Назовите особенности в конструкциях испарителей абсорбционных холодильных машин.

20. Изобразите принципиальные конструкции абсорбера и генератора.

Глава седьмая

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

Автоматизация промышленных объектов возможна только при условии, когда известны их динамические характеристики. Предварительное изучение динамических свойств процесса необходимо для выбора рациональной схемы регулирования, типов регуляторов и правильной их настройки.

Изучение динамических свойств и определение динамических характеристик промышленных объектов могут быть проведены экспериментальными методами, которые в настоящее время разработаны с большой полнотой. Эти методы позволяют получать наиболее достоверные сведения о процессе. В последнее время получили развитие статистические методы исследования [Л. 47], дающие возможность определять динамические характеристики объектов в условиях их нормальной эксплуатации. Однако определенные экспериментально динамические характеристики могут быть использованы только для того объекта, на котором они изучались, и с той или иной точностью для очень узкого класса аналогичных объектов.

Появление математических машин вызвало широкое развитие аналитических методов получения динамических характеристик [Л. 8, 13, 19, 35, 40—47, 57, 78]. При этом одними и теми же уравнениями можно описывать свойства большого класса объектов. Аналитические методы играют особенно важную роль при необходимости определения динамических свойств объектов регулиро-

вания в процессе их проектирования. Составлению дифференциальных уравнений динамики объектов уделялось значительное внимание с момента зарождения теории автоматического регулирования, однако встретившиеся математические трудности решения задачи, необходимость введения большого числа упрощений и вследствие этого недостаточная для практических применений точность решения обусловили широкое распространение экспериментальных методов. Применение вычислительных машин устраняет эти трудности.

Дальнейшее развитие методов исследования динамических свойств объектов идет по пути сочетания аналитических и экспериментальных методов. Сопоставление аналитических и экспериментальных данных позволяет получить большую уверенность в правильности теоретических выводов и глубже понять физику процесса. Использование экспериментальных статических характеристик позволяет построить адекватную динамическую модель процесса. В то же время наличие теоретических уравнений динамики позволяет распространить полученные результаты на установки других типов и, что особенно важно, вносить корректировку в конструкцию аппаратов и создавать тем самым наиболее благоприятные условия для их автоматизации.

Ниже рассматриваются аналитические методы определения динамических характеристик некоторых тепло- и массообменных аппаратов.

7-1. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Ограничим рассмотрение случаями параллельного тока теплоносителей. Выведем уравнения, описывающие динамические свойства рассматриваемого теплообменника. Если не ввести некоторых допущений, относящихся к физике процесса, то эти уравнения будут очень сложными. Для упрощения математического исследования сделаем следующие допущения [Л. 47]:

1) взяты усредненные значения температур по сечению трубопровода и рассматривается только изменение температур по направлению потока;

2) влиянием свободной конвекции жидкости на коэффициент теплообмена можно пренебречь, и поэтому рассматривается только вынужденная конвекция;

3) можно пренебречь количеством тепла, проходящим в направлении потока за счет теплопроводности как в жидкости, так и в стенке трубы;

4) эффекты излучения и проводимости в радиальном направлении учтены в локальных коэффициентах теплоотдачи;

5) теплоемкости теплоносителей приняты постоянными;

6) плотность несжимаемой жидкости также постоянна;

7) коэффициенты теплоотдачи конвекцией являются функциями температуры и скорости для данных аппаратов;

8) механической энергией (кинетической и потенциальной) можно пренебречь по сравнению с тепловой;

9) учитывается тепловая емкость стенки;

10) теплопроводность материала стенки принимается бесконечной;

11) потерями в окружающую среду можно пренебречь.

Выделим по длине теплообменника участок dx (рис. 7-1). К элементарному объему, ограниченному сечениями x и $x+dx$, может быть применен общий закон сохранения для непрерывных процессов: накопление равно поступлению минус потери. В момент времени τ количество тепла dQ_1 , накопленное греющим теплоносителем в объеме $A_1 dx$, где A_1 — поперечное сечение внутренней трубы, равно:

$$dQ_1 = \rho_1 c_{p1} T_1 A_1 dx,$$

где ρ_1, c_{p1} — плотность и теплоемкость греющего теплоносителя; T_1 — температура греющего теплоносителя в точке x .

При условии постоянства плотности и теплоемкости жидкости накопленное количество тепла dQ_2 в момент времени $\tau + d\tau$ составит:

$$dQ_2 = \rho_1 c_{p1} \left(T_1 + \frac{\partial T_1}{\partial \tau} d\tau \right) A_1 dx.$$

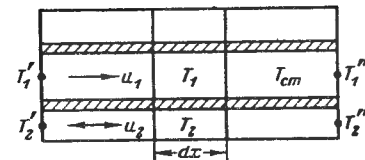


Рис. 7-1. Схема теплообменника «труба в трубе».

Таким образом, количество тепла, накопленное в участке dx за промежуток времени $d\tau$, представляет собой разность $dQ = dQ_2 - dQ_1$, т. е.

$$dQ = \rho_1 c_{p1} \left(T_1 + \frac{\partial T_1}{\partial x} dx \right) A_1 dx - \rho_1 c_{p1} T_1 A_1 dx$$

и, следовательно,

$$dQ = \rho_1 c_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial x} A_1 dx d\tau.$$

Для греющего теплоносителя поступление тепла в участок dQ_3 обусловлено только перемещением жидкости и составляет в сечении x за время $d\tau$:

$$dQ_3 = \rho_1 c_{p1} T_1 u_1 A_1 d\tau,$$

где u_1 — линейная скорость жидкости.

Потери тепла на участке dx происходят как вследствие перемещения жидкости, так и вследствие теплоотдачи. Потери тепла с потоком жидкости dQ_4 через сечение $x + dx$ за время $d\tau$ составляют:

$$dQ_4 = \rho_1 c_{p1} \left(T_1 + \frac{\partial T_1}{\partial x} dx \right) u_1 A_1 d\tau.$$

Потери тепла вследствие теплоотдачи стенке dQ_5 за время $d\tau$ на участке dx равны:

$$dQ_5 = \pi D_1 dx \alpha_1 (T_1 - T_{ст}) d\tau,$$

где D_1 — внутренний диаметр трубы; α_1 — коэффициент теплоотдачи от греющего теплоносителя к стенке; $T_{ст}$ — температура стенки.

Комбинируя полученные выражения в уравнении закона сохранения, получим после деления всех членов на $dx d\tau$:

$$A_1 \rho_1 c_{p1} \frac{\partial T_1}{\partial x} + \rho_1 c_{p1} u_1 A_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + \pi D_1 \alpha_1 (T_1 - T_{ст}) = 0. \quad (7-1)$$

Аналогично могут быть получены уравнения для температуры нагреваемой жидкости T_2 и температуры стенки $T_{ст}$. Для нагреваемой жидкости накопление тепла dQ_6 за время $d\tau$ на участке dx составляет:

$$dQ_6 = A_2 \rho_2 c_{p2} dx \frac{\partial T_2}{\partial x} d\tau,$$

где A_2 — проходное сечение для нагреваемого теплоносителя; ρ_2 , c_{p2} — его плотность и теплоемкость.

Поступление тепла в участок dx происходит с потоком жидкости и за счет теплоотдачи от стенки. Поступление тепла с потоком жидкости при прямотоке dQ_7 за время $d\tau$ определяется выражением

$$dQ_7 = \rho_2 c_{p2} T_2 u_2 A_2 d\tau,$$

где u_2 — линейная скорость жидкости.

Поступление тепла за счет теплоотдачи от стенки dQ_8 за время $d\tau$ определяется выражением

$$dQ_8 = \pi D_2 dx \alpha_2 (T_{ст} - T_2) d\tau,$$

где D_2 — наружный диаметр трубы; α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемому теплоносителю.

Потеря тепла из элемента $dx dQ_9$ связана только с потоком жидкости и составляет за время $d\tau$:

$$dQ_9 = \rho_2 c_{p2} \left(T_2 + \frac{\partial T_2}{\partial x} dx \right) u_2 A_2 d\tau.$$

Составляя далее уравнение закона сохранения для участка dx и интервала времени $d\tau$, получаем дифференциальное уравнение для температуры нагреваемой жидкости

$$A_2 \rho_2 c_{p2} \frac{\partial T_2}{\partial x} + \rho_2 c_{p2} u_2 A_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \pi D_2 \alpha_2 (T_{ст} - T_2) = 0. \quad (7-2)$$

Для участка dx стенки накопление тепла dQ_{10} за время $d\tau$ составляет:

$$dQ_{10} = \frac{\pi (D_2^2 - D_1^2)}{4} dx \rho_{ст} c_{ст} \frac{dT_{ст}}{d\tau} d\tau,$$

где $\rho_{ст}$, $c_{ст}$ — плотность и теплоемкость материала стенки.

Поступление тепла к стенке dQ_{11} происходит за счет теплоотдачи от греющего теплоносителя и составляет за время $d\tau$:

$$dQ_{11} = \pi D_1 dx \alpha_1 (T_1 - T_{ст}) d\tau.$$

Потери тепла стенкой dQ_{12} связаны с теплоотдачей нагреваемому теплоносителю и составляют:

$$dQ_{12} = \pi D_2 dx \alpha_2 (T_{ст} - T_2) d\tau.$$

Составляя уравнение закона сохранения для стенки и принимая приближенно $D_1 = D_2 = D_{\text{ср}}$, получим:

$$\rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}} x_{\text{ст}} \frac{dT_{\text{ст}}}{d\tau} + \alpha_2 (T_{\text{ст}} - T_2) - \alpha_1 (T_1 - T_{\text{ст}}) = 0, \quad (7-3)$$

где $x_{\text{ст}} = \frac{D_2 - D_1}{2}$ — толщина стенки.

Если стенка тонка настолько, что ее тепловой емкостью можно пренебречь, то в нестационарных режимах будет справедливо такое же уравнение для температуры стенки, как и в стационарном режиме, т. е. теплоотдача между горячей и холодной жидкостями может быть описана с помощью коэффициента теплопередачи. Температура стенки в этом случае будет однозначно определяться температурами омывающих ее жидкостей.

В том случае, когда теплопроводность стенки не может быть принята бесконечной, при описании нестационарных режимов необходимо учитывать динамику изменения поля температур в стенке. Последняя, как известно, описывается уравнением теплопроводности.

Таким образом, уравнения (7-1), (7-2) и (7-3) представляют собой математическую модель теплообменника «труба в трубе» и описывают его динамические свойства. В качестве граничных условий должны быть заданы температуры теплоносителей на входе:

$$T_1|_{x=0} = T'_1(\tau)$$

$$T_2|_{x=0} = T'_2(\tau).$$

При противотоке изменяются направление скорости u_2 и, следовательно, знак второго члена в уравнении (7-2).

Исследование динамических характеристик, описываемых полученными уравнениями, удобно производить с помощью вычислительных машин, так как аналитическое исследование системы дифференциальных уравнений в частных производных затруднительно. В частности, для этого могут быть использованы аналоговые вычислительные машины, наиболее удобные для исследования динамических свойств [Л. 43, 53].

При наборе уравнений на аналоговой машине возможна только одна независимая переменная — время. Поэтому по пространственной координате уравнения должны быть представлены в конечных разностях.

Заменяя производные $\partial T / \partial x$ на разностные отношения $\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x}$, получаем для уравнений (7-1), (7-3):

$$\begin{aligned} \frac{dT_{1i}}{d\tau} = & - \left(\frac{u_1}{\Delta x_i} + \frac{\pi D_1}{A_1} \frac{\alpha_1}{\rho_1 c_{p1}} \right) T_{1i} + \\ & + \frac{u_1}{\Delta x_i} T_{1i-1} + \frac{\pi D_1 \alpha_1}{A_1 \rho_1 c_{p1}} T_{\text{ст}i}; \end{aligned} \quad (7-4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\text{ст}i}}{d\tau} = & - \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{\text{ст}i} + \frac{\alpha_1}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{1i} + \frac{\alpha_2}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{2i}; \quad (7-5) \\ \frac{dT_{2i}}{d\tau} = & - \left(\frac{u_2}{\Delta x_i} + \frac{\pi D_2}{A_2} \frac{\alpha_2}{\rho_2 c_{p2}} \right) T_{2i} - \\ & - \frac{u_2}{\Delta x_i} T_{2(i-1)} + \frac{\pi D_2 \alpha_2}{A_2 \rho_2 c_{p2}} T_{\text{ст}i}. \end{aligned} \quad (7-6)$$

Для первого участка ($i=1$) с учетом граничных условий имеем:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{11}}{d\tau} = & - \left(\frac{u_1}{\Delta x_{1/2}} + \frac{\pi D_1}{A_1} \frac{\alpha_1}{\rho_1 c_{p1}} \right) T_{11} + \\ & + \frac{u_1}{\Delta x_{1/2}} T'_1 + \frac{\pi D_1}{A_1} \frac{\alpha_1}{\rho_1 c_{p1}} T_{\text{ст}1}; \end{aligned} \quad (7-7)$$

$$\frac{dT_{\text{ст}1}}{d\tau} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{\text{ст}1} + \frac{\alpha_1}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{11} + \frac{\alpha_2}{x_{\text{ст}} \rho_{\text{ст}} c_{\text{ст}}} T_{21}; \quad (7-8)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_{21}}{d\tau} = & - \left(\frac{u_2}{\Delta x_{1/2}} + \frac{\pi D_2}{A_2} \frac{\alpha_2}{\rho_2 c_{p2}} \right) T_{21} + \\ & + \frac{u_2}{\Delta x_{1/2}} T'_1 + \frac{\pi D_2 \alpha_2}{A_2 \rho_2 c_{p2}} T_{\text{ст}1}. \end{aligned} \quad (7-9)$$

Для случая противотока граничным участком для нагреваемого теплоносителя является n -й участок.

На рис. 7-2 показана структурная схема системы уравнений (7-4) — (7-9), на которой изображены только первое и последнее звенья. Между ними может быть расположено сколько угодно промежуточных звеньев, аналогичных последнему. Точность воспроизведения уравнений в частных производных при этом определяется числом интервалов разбиения.

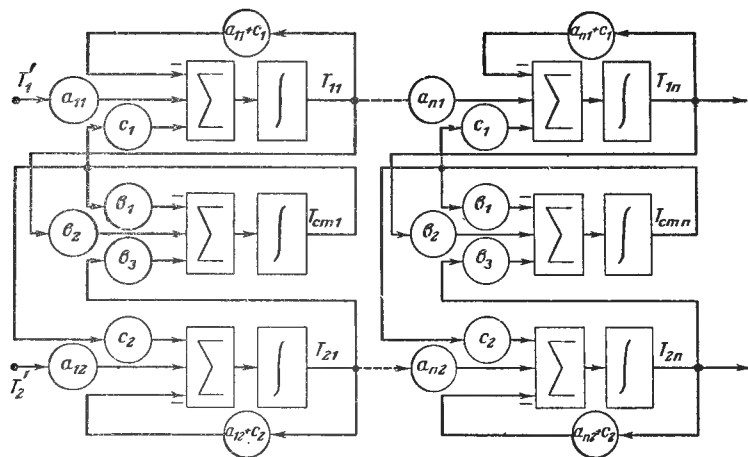


Рис. 7-2. Структурная схема математической модели теплообменника «труба в трубе».

$$a_{1j} = \frac{u_j}{\Delta x_1} \quad (j = 1, 2);$$

$$a_{ij} = \frac{u_j}{\Delta x_1} \quad (i = 2, \dots, n; j = 1, 2);$$

$$c_j = \frac{\pi D_j \alpha_j}{A_j \rho_j c_{pj}} \quad (j = 1, 2).$$

Уравнения (7-7) — (7-12) могут быть набраны на аналоговой машине после выбора масштабов изменения температуры и времени и расчета на основании этого передаточных коэффициентов отдельных блоков машины [Л. 43].

Переходные процессы могут возникнуть в теплообменнике по следующим причинам:

1) колебания температур теплоносителей на входе в теплообменник, что соответствует в структурной схеме изменению T_1' и T_2' или соответствующих им напряжений;

2) изменения скоростей жидкостей, что в структурной схеме аналогично изменению коэффициентов, содержащих u_1 и u_2 . Введением нелинейных блоков можно учесть при этом влияние скоростей на коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 ;

3) изменения условий теплообмена из-за загрязнения поверхностей труб или по каким-либо другим причинам.

Изменение температур греющего и нагреваемого теплоносителей на выходе теплообменника в переходном режиме можно наблюдать по напряжению на выходе последнего звена (рис. 7-2). С помощью схемы рис. 7-2, набранной на аналоговой машине, могут быть легко и быстро изучена реакция теплообменного аппарата на разнообразные возмущающие воздействия; исследована динамика изменения характеристик теплообменника в результате старения; изучено влияние размеров и конструктивных параметров на динамические характеристики аппарата. При этом в качестве возмущающих воздействий могут быть выбраны либо наиболее часто встречающиеся на практике, либо облегчающие построение амплитудно-фазовых частотных характеристик, необходимых для синтеза систем автоматического регулирования. На рис. 7-3 приведена кривая изменения выходной температуры греющего теплоносителя T_1' при синусоидальном изменении входной температуры T_1' для теплообменника «труба в трубе».

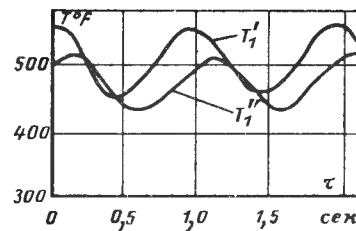


Рис. 7-3. Динамическая характеристика теплообменника «труба в трубе».

7-2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПАРНЫХ АППАРАТОВ

В отношении регулирования выпарной аппарат является сложным объектом. Эта сложность объясняется не только тем, что он является типичным нелинейным объектом, подверженным различным по форме возмущениям, но и наличием значительных запаздываний, особенно при изменении основного параметра — концентрации раствора.

Для исследования динамических свойств процесса выпаривания составим математическое описание процесса [Л. 84, 85]. Несмотря на большое разнообразие конструкций и режимов работы выпарных аппаратов,

физическая природа происходящих в них процессов одинакова. Основные из них следующие: 1) конденсация пара в греющей камере; 2) передача тепла от пара кипящей жидкости (через греющую стенку); 3) кипение жидкости, в результате которого выделяются пары растворителя и раствор становится более концентрированным.

В соответствии с этим каждый выпарной аппарат имеет следующие основные элементы: 1) пространство греющего пара; 2) поверхность нагрева; 3) пространство кипящей жидкости и вторичного пара (парожидкостное пространство).

Математическое описание процесса выпаривания должно состоять из связанных одно с другим уравнений, с помощью которых можно описывать элементарные процессы.

При описании процессов в греющей камере будем пренебрегать концентрацией неконденсирующихся газов, составляющих меньше 1%, и количеством конденсата, скапливающимся в нижней части камеры. При нормальной работе конденсатоотводчика последнее допущение выполняется с большой точностью. Математическое описание процессов в греющей камере должно включать уравнения материального и теплового балансов. Уравнение материального баланса для греющей камеры имеет вид:

$$\frac{d(M_1 + M_2)}{d\tau} = D_1 - D_k - D'_1, \quad (7-10)$$

где M_1 — масса пара в греющей камере; M_2 — масса пленки конденсата на поверхности нагрева; D_1 , D_k , D'_1 — расходы греющего пара, конденсата и пара с отводимыми неконденсирующимися газами.

Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\frac{dQ_\Sigma}{d\tau} = (D_1 - D'_1) i_0 - D_k i'_k - Q_1 - Q'_1, \quad (7-11)$$

где i_0 , i'_k — энтальпии греющего пара и конденсата; Q_1 , Q'_1 — количество тепла, передаваемое поверхности нагрева в единицу времени, и потери тепла в окружающую среду; Q_Σ — количество тепла, аккумулированное греющей камерой:

$$Q_\Sigma = M_1 u_n + M_2 c' t_k + M_m c_m t_m + M_n c_n t_n, \quad (7-12)$$

где u_n — внутренняя энергия пара в греющей камере; c' , t_k — теплоемкость и температура конденсата; M_m , c_m , t_m — масса, теплоемкость и температура металла корпуса греющей камеры; M_n , c_n , t_n — масса, теплоемкость и температура изоляции корпуса. Полагая c_m , M_m , c_n , M_n постоянными и объединяя уравнения материального и теплового балансов, получаем:

$$\begin{aligned} M_1 \frac{du_n}{d\tau} + (u_n - i') \frac{dM_1}{d\tau} + (c' t_k - i') \frac{dM_2}{d\tau} + M_2 \frac{d(c' t_k)}{d\tau} + \\ + M_m c_m \frac{dt_m}{d\tau} + M_n c_n \frac{dt_n}{d\tau} = \\ = (D_1 - D'_1) (i_0 - i') - Q_1 - Q'_1. \end{aligned} \quad (7-13)$$

Масса пара M_1 и масса пленки конденсата M_2 выражаются как

$$M_1 = \rho' V_1; \quad (7-14)$$

$$M_2 = \rho' V_2, \quad (7-15)$$

где ρ' и ρ'' — плотность конденсата и пара; V_1 , V_2 — объем пара и пленки конденсата.

Внутренняя энергия и плотность сухого насыщенного пара, а также плотность и теплоемкость воды на линии насыщения являются функциями температуры или давления:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial u}{\partial t_n} \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{\partial u}{\partial P_n} \frac{dP_n}{d\tau}; \quad (7-16)$$

$$\frac{\partial \rho''}{\partial \tau} = \frac{\partial \rho''}{\partial t_n} \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{\partial \rho''}{\partial P_n} \frac{dP_n}{d\tau}; \quad (7-17)$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial \tau} = \frac{\partial \rho'}{\partial t_n} \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{\partial \rho'}{\partial P_n} \frac{dP_n}{d\tau}; \quad (7-18)$$

$$\frac{\partial c'}{\partial \tau} = \frac{\partial c'}{\partial t_n} \frac{dt_n}{d\tau} = \frac{\partial c'}{\partial P_n} \frac{dP_n}{d\tau}, \quad (7-19)$$

где t_n — температура насыщения; P_n — давление, соответствующее температуре насыщения.

Предположим, что $\frac{dt_k}{d\tau} = \frac{dt_n}{d\tau}$. Принимая во внимание, что $i' = c' t_k$, и учитывая соотношения (7-14) — (7-19),

получаем вместо (7-13) следующее уравнение:

$$a_1^* \frac{dt_n}{d\tau} + M_m c_m \frac{dt_m}{d\tau} + M_n c_n \frac{dt_n}{d\tau} = (D_1 - D_1') (i_0 - i') - Q_1 - Q_1', \quad (7-20)$$

где
$$a_1^* = (V_3 - V_2) \left[\rho'' \frac{\partial u_n}{\partial t_n} + (u - i') \frac{\partial \rho''}{\partial t_n} \right] + V_2 \rho' \left(c' + t_k \frac{\partial c'}{\partial t_k} \right).$$

Рассматривая стенку греющей камеры и изоляцию как сосредоточенные емкости, составляем для них уравнения теплового баланса. Обычно с достаточной степенью точности можно принять:

$$t_m = t_n - \Psi; \quad t_n = \frac{t_m + t_0}{2},$$

где Ψ — постоянная величина; t_0 — температура окружающей среды.

Тогда

$$\frac{dt_m}{d\tau} = \frac{dt_n}{d\tau}$$

и

$$M_m c_m \frac{dt_m}{d\tau} + M_n c_n \frac{dt_n}{d\tau} = (M_m c_m + 0,5 M_n c_n) \frac{dt_n}{d\tau}. \quad (7-21)$$

Количество тепла, передаваемое поверхности нагрева Q_1 , можно вычислить по формуле

$$Q_1 = \frac{F_1'}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{2\lambda_{ст}}} (t_n - t_{ст}), \quad (7-22)$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от греющего пара к стенке трубы; F_1' — поверхность конденсации; $\delta_{ст}$ — толщина стенки поверхности теплообмена; $\lambda_{ст}$ — коэффициент теплопроводности материала поверхности нагрева.

Температура стенки $t_{ст}$ отнесена к ее середине, и второй член в знаменателе означает термическое сопротивление половины стенки.

Подставляя уравнения (7-21) и (7-22) в уравнение (7-20), получаем приближенное дифференциальное урав-

нение для определения температуры пара в греющей камере:

$$a_1 \frac{dt_n}{d\tau} = -a_2 t_n + a_3 t_{ст} + a_4 (D_1 - D_1') + a_5, \quad (7-23)$$

где

$$a_1 = a_1^* + M_m c_m + 0,5 M_n c_n;$$

$$a_2 = a_3 \frac{F_1'}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{2\lambda_{ст}}};$$

$$a_4 = i_0 - i_1';$$

$$a_5 = -Q_1'.$$

Уравнение (7-23) для греющей камеры содержит температуру поверхности нагрева $t_{ст}$, для определения которой должно быть составлено соответствующее дифференциальное уравнение.

Сделаем следующие предположения:

1) размеры труб испарителя одинаковы и трубы выполнены из материала с одинаковыми теплофизическими свойствами;

2) тепловой поток вдоль оси труб отсутствует;

3) все трубы испарителя воспринимают одинаковое количество тепла;

4) распределение температуры по толщине стенки трубы не учитывается.

Тогда уравнение теплового баланса для поверхности нагрева кипяtilьных труб имеет вид:

$$M_3 c_m \frac{dt_{ст}}{d\tau} = Q_1 - Q_2,$$

где M_3 — масса металла поверхности нагрева; Q_3 — количество тепла, передаваемое кипящей жидкостью трубами; Q_1 — определяется уравнением (7-22); Q_2 — определяется следующим выражением:

$$Q_2 = \frac{F_1''}{\frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{ст}}{2\lambda_{ст}} + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} (t_{ст} - t), \quad (7-24)$$

где F_1'' — поверхность нагрева со стороны кипящей жидкости; t — температура кипящей жидкости; α_2 —

коэффициент теплоотдачи к кипящей жидкости;
 δ_n, λ_n — толщина и теплопроводность слоя накипи.

Для получения математического описания переходных процессов в парожидкостном пространстве рассмотрим совместно уравнения материального и теплового балансов.

Уравнение материального баланса для парожидкостного пространства имеет вид:

$$\frac{d(M_{ж} + M_{п})}{d\tau} = G_0 - G_1 - W, \quad (7-25)$$

где $M_{ж}, M_{п}$ — массы жидкости и пара в аппарате;
 G_0, G_1 — расходы жидкости на входе и на выходе из аппарата;
 W — расход образующегося пара на выходе из аппарата.

Составим тепловой баланс для парожидкостного пространства при условии идеального перемешивания раствора в пространстве аппарата. Суммарный тепловой поток ΔQ для парожидкостного пространства равен:

$$\Delta Q = Q_2 + G_0 c_0 t' - G_1 c' t_1 - W i_1, \quad (7-26)$$

где c_0, c' — теплоемкости жидкости на входе в аппарат и в аппарате;
 t' — температура жидкости на входе в аппарат;
 i_1 — энтальпия вторичного пара.

Скорость изменения суммарного количества тепла парожидкостного пространства Q'_Σ определяется уравнением

$$\frac{dQ'_\Sigma}{d\tau} = \Delta Q. \quad (7-27)$$

Величина Q'_Σ определяется выражением

$$Q'_\Sigma = \rho'' c' V_{ж} t + c_m \Sigma M_i t'_m + (V_0 - V_{ж}) \rho'' u_1, \quad (7-28)$$

где $V_0, V_{ж}$ — объем парожидкостного пространства и жидкости соответственно;
 ΣM_i — масса металла, соприкасающегося с парожидкостным пространством (за исключением металла поверхности нагрева);
 u_1 — внутренняя энергия пара.

Предположим, что температура вторичного пара t_1 и температура металла, соприкасающегося с парожидкостным пространством t'_m , отличаются от температуры

кипения жидкости на постоянные величины. Тогда

$$\frac{dt'_m}{d\tau} = \frac{dt_1}{d\tau} = \frac{dt}{d\tau}.$$

Принимая плотность и теплоемкость раствора постоянными для данного аппарата и используя соотношения (7-16) и (7-17) вместо (7-27), получаем:

$$d_1 \frac{dt}{d\tau} + d'_1 \frac{dV_{ж}}{d\tau} = \Delta Q, \quad (7-29)$$

где $d_1 = \rho''' c' V_{ж} + c_m \Sigma M_i + \rho'' (V_0 - V_{ж}) \frac{\partial u_1}{\partial t_1} +$

$$+ u_1 (V_0 - V_{ж}) \frac{\partial \rho''}{\partial t_1};$$

$$d'_1 = \rho''' c' t - \rho'' u_1.$$

При небольших возмущениях по расходам $dV_{ж}/d\tau$ в уравнении (7-21) мало. Тогда уравнение (7-29) превращается в уравнение

$$d_1 \frac{dt}{d\tau} = \Delta Q. \quad (7-30)$$

Пренебрегая в уравнении (7-25) $M_{п}$ по сравнению с $M_{ж}$, что обычно справедливо для выпарных аппаратов, получаем:

$$\rho' \frac{dV_{ж}}{d\tau} = G_0 - G_1 - W. \quad (7-31)$$

Уравнение (7-31) можно легко преобразовать в уравнение для уровня жидкости в аппарате. Если объем жидкости определяется уравнением

$$V_{ж} = \Phi h,$$

где Φ — площадь поперечного сечения аппарата;
 h — уровень жидкости,

то вместо уравнения (7-23) будем иметь:

$$e_1 \frac{dh}{d\tau} = G_0 - G_1 - W, \quad (7-32)$$

где

$$e_1 = \Phi \rho'.$$

Для описания динамических свойств выпарного аппарата необходимо вывести уравнение для определения концентрации раствора в аппарате. Это уравнение пред-

ставляет собой материальный баланс сухих веществ. Будем пренебрегать уносом жидкости с паром. Учитывая, что жидкость перемешана идеально, имеем:

$$\frac{d(M_{ж}b)}{d\tau} = b_0 G_0 - bG_1, \quad (7-33)$$

где b_0, b — концентрации раствора на входе в аппарат и в аппарате.

Принимая во внимание уравнение (7-31) или (7-32), можно переписать уравнение (7-33) в виде

$$f_1 \frac{db}{d\tau} = b_0 G_0 - b(G_0 - W), \quad (7-34)$$

где

$$f_1 = \Phi \rho' h.$$

Таким образом, получена замкнутая система уравнений, описывающая с принятыми допущениями динамические свойства выпарного аппарата. Она состоит из следующих уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } a_1 \frac{dt_n}{d\tau} &= -a_2 t_n + a_3 t_{ст} + \\ &+ a_4 (D_1 - D'_1) + a_5; \\ \text{б) } c_1 \frac{dt_{ст}}{d\tau} &= -c_2 t_{ст} + c_3 t_n + c_4 t; \\ \text{в) } d_1 \frac{dt}{d\tau} &= -d_2 t + d_3 t_{ст} - d_4 W; \\ \text{г) } f_1 \frac{db}{d\tau} &= -(G_0 - W)b + G_0 b_0; \\ \text{д) } e_1 \frac{dh}{d\tau} &= G_0 - G_1 - W. \end{aligned} \right\} \quad (7-35)$$

Этой системой уравнений устанавливается связь между переменными $t_n, t_{ст}, t, b$ и h при различных регулирующих и возмущающих воздействиях D_1, D'_1, G_0, b_0, i_0 и δ_n . Для определения расхода вторичного пара W систему уравнений, описывающую процессы в данном аппарате, необходимо рассматривать совместно с уравнениями, описывающими процессы аппарата, в который направляются вторичные пары.

Коэффициенты a_1, c_1, d_1, f_1 и e_1 системы (7-35) характеризуют инерционность выпарного аппарата по темпе-

ратурам пара в греющей камере, поверхности нагрева и кипящей жидкости, концентрации и уровню. Остальные коэффициенты характеризуют статические свойства выпарного аппарата.

Коэффициент a_1 характеризует суммарную тепловую емкость пара в греющей камере, пленки конденсата, металла корпуса греющей камеры и изоляции. Можно показать, что при колебаниях температуры пара в греющей камере в обычных для эксплуатации пределах ($\pm 10\%$) a_1 можно принять постоянным. Коэффициент $a_2 = a_3$ определяется в основном коэффициентом теплоотдачи при конденсации пара. Можно показать, что скорость изменения температурного режима выпарного аппарата на четыре-пять порядков ниже скорости изменения a_1 при переходных режимах, и поэтому последний можно вычислить по статическим зависимостям.

Коэффициент $a_4 = i_0 - i'$ можно считать постоянным при изменении температуры на $\pm 20^\circ \text{C}$. Потери тепла в окружающую среду Q'_1 практически не изменяются при изменении тепловой нагрузки аппарата на $\pm 30\%$, и поэтому $a_5 = \text{const}$.

В уравнении (б) системы (7-35)

$$c_1 = M_3 c_m = \text{const};$$

$$c_3 = a_2 = a_3 = \text{const}; \quad c_2 = c_3 + c_4,$$

где c_4 определяется коэффициентом теплоотдачи при кипении жидкости a_2 (при заданной поверхности нагрева F'_1 , толщине и теплопроводности слоя накипи). Коэффициент a_2 можно рассчитывать по статическим зависимостям, так как скорость его изменения очень велика. При небольших отклонениях плотности теплового потока от номинальной ($\pm 30\%$) его можно считать постоянным. При заданных конструктивных размерах коэффициент d_1 зависит от температуры и уровня (количества) жидкости и при небольших отклонениях последних от равновесных значений может считаться постоянным. Коэффициент f_1 зависит от уровня жидкости и при небольших его изменениях может считаться постоянным. Коэффициент e_1 определяется для заданного аппарата плотностью жидкости и может приниматься постоянным, так как последняя изменяется незначительно.

На основе системы уравнений (7-27) для одноступенчатого аппарата можно получить математическое описание многоступенчатой выпарной установки. При этом

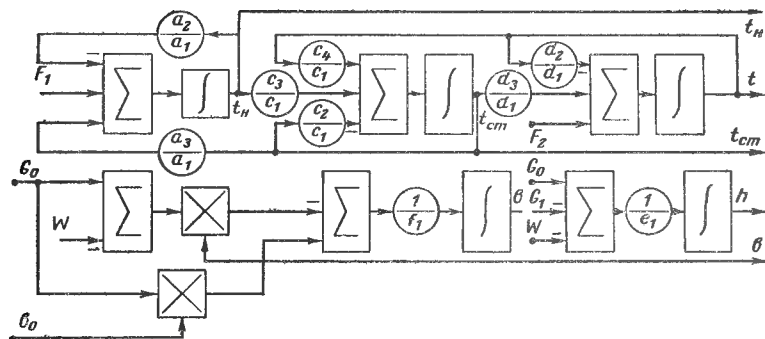


Рис. 7-4. Структурная схема математической модели выпарного аппарата.

для каждой ступени составляют идентичную систему уравнений при соблюдении следующих условий:

а) для прямоточной выпарной установки температура, концентрация, расход раствора и расход пара на входе i -го аппарата равны этим параметрам на выходе $(i-1)$ -го аппарата; температура пара на входе в i -й аппарат равна температуре пара в $(i-1)$ -м аппарате минус суммарная температурная депрессия $t_{ni} = t_{i-1} - \Delta_i$;

б) для противоточной выпарки расход пара и температура на входе в i -й аппарат определяются так же, как при прямоточной выпарке, а температура, концентрация и расход раствора на входе в i -й аппарат равны соответствующим параметрам на выходе $(i+1)$ -го аппарата.

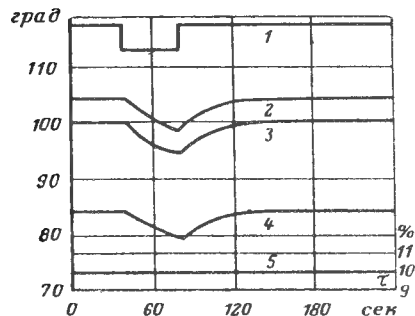


Рис. 7-5. Переходные характеристики выпарного аппарата при импульсном возмущении расходом греющего пара.

1 — расход греющего пара; 2, 3, 4 — температуры соответственно пара в греющей камере, поверхности нагрева и кипящей жидкости; 5 — концентрация.

Динамические свойства выпарного аппарата или многоступенчатой выпарной установки, описываемых системой уравнений (7-35), удобно исследовать на аналоговой машине.

На рис. 7-4 приведена структурная схема одноступенчатой выпарной установки, составленная в соответствии с уравнением (7-35). На рис. 7-5 приведены полученные на аналоговой машине

МНБ-1 импульсные характеристики одноступенчатого выпарного аппарата по температурам и концентрации при условии постоянства уровня при возмущении расходом греющего пара. Из графиков видно, что за время перехода температур к установившемуся состоянию концентрация практически не изменялась. Это дает возможность рассматривать уравнения для концентрации и уровня отдельно от уравнений для температурного режима и осуществлять их моделирование отдельно. На рис. 7-6 в качестве примера приведены переходные характеристики трехступенчатой выпарной установки, полученные на аналоговой машине.

7-3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕКТИФИКАЦИОННЫХ КОЛОНН

Ректификационная установка состоит из укрепляющей части колонны, исчерпывающей части колонны, пятильника, дефлегматора и конденсатора. Работа ректификационной колонны сопровождается связанными между собой процессами тепло- и массообмена и физико-химическими превращениями. Полное математическое

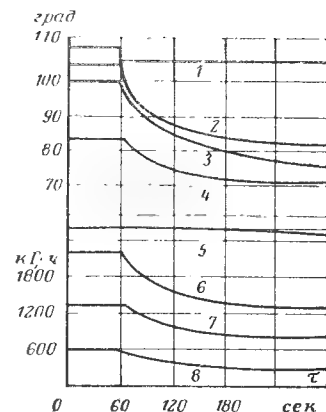


Рис. 7-6. Переходные характеристики выпарной установки при ступенчатом возмущении расходом греющего пара.

1 — расход греющего пара $\Delta D = 1000 \text{ кг/ч}$; 2, 3, 4, 5 — соответственно температуры пара в греющей камере, поверхности нагрева, кипящей жидкости и концентрация в первом аппарате; 6, 7, 8 — расход вторичного пара соответственно первого, второго и третьего аппаратов.

описание процессов, происходящих в ректификационной колонне, очень сложно. Для упрощенного математического описания работы ректификационной колонны примем следующие упрощающие предположения [Л. 19]:

- 1) давление во всей установке постоянно;
- 2) тепловой баланс не рассматривается;
- 3) молярные потоки в колонне постоянны;
- 4) массой паров на тарелках по сравнению с массой жидкости пренебрегают;
- 5) на диаграмме равновесия линия равновесия представляет собой прямую;
- 6) эффективность тарелки принимается равной 100%; предполагается, что жидкость перемешана на тарелке идеально;

7) при выводе уравнений рассматриваются малые отклонения от стационарного режима.

Уравнение материального баланса по низкокипящему компоненту для одной i -й тарелки укрепляющей части колонны при нестационарных условиях имеет вид:

$$R(x_{i+1} - x_i) + V(y_{i-1} - y_i) = M \frac{dx_i}{d\tau}, \quad (7-36)$$

где R — флегмовое число; M — количество жидкости на тарелке; V — скорость паров; x_i , y_i — концентрации жидкости и пара на i -й тарелке.

Уравнение линии равновесия в диапазоне рабочих условий имеет вид:

$$y = \alpha x + \xi. \quad (7-37)$$

Применив уравнение (7-37) вместо уравнения (7-36), получим:

$$R(x_{i+1} - x_i) + V\alpha(x_{i-1} - x_i) = M \frac{dx_i}{d\tau}$$

или

$$Rx_{i+1} - (R + V\alpha)x_i + V\alpha x_{i-1} = M \frac{dx_i}{d\tau}. \quad (7-38)$$

Это уравнение справедливо для всех тарелок укрепляющей части колонны.

Для питающей тарелки в уравнение добавляется еще один член, связанный с входным потоком питающей жидкости:

$$Rx_{m+1} - (R + V\alpha)x_m + V\alpha x_{m-1} + Fx_F = M \frac{dx_m}{d\tau}, \quad (7-39)$$

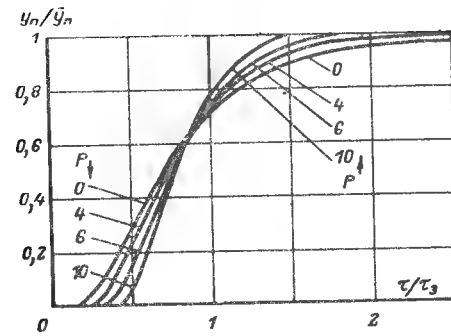


Рис. 7-7. Переходная характеристика ректификационной колонны по концентрации пара в верхней части колонны при ступенчатом изменении концентрации питающего раствора.

где m — номер питающей тарелки; x_F — концентрация поступающей жидкости; F — расход поступающей жидкости.

Для тарелок исчерпывающей части колонны поток жидкости, стекающей с предыдущей тарелки, увеличивается на величину входного потока и составляет $R + F$. Таким образом, для j -й тарелки исчерпывающей части колонны вместо уравнения (7-38) имеем:

$$(R + F)x_{j+1} - (R + F + V\alpha)x_j + V\alpha x_{j-1} = M \frac{dx_j}{d\tau}, \quad (7-40)$$

где

$$j = 1, 2, \dots, m - 1.$$

Система уравнений (7-38) — (7-39) может быть решена аналитически или исследована на аналоговой машине. Уравнения (7-38) при $i = m + 1, \dots, n$, (7-39) и (7-40) при $j = 1, 2, \dots, m - 1$ позволяют исследовать влияние различных возмущений на выходные параметры колонны: концентрацию пара в верхней части колонны y_n и концентрацию жидкости, стекающей в куб x_1 .

На рис. 7-7 приведены кривые переходных процессов по концентрации пара в верхней части колонны y_n при ступенчатом изменении концентрации питания x_F , рас-

считанные теоретически по уравнениям (7-38) — (7-40). Кривые получены при различных значениях параметра $P=n |\lg S|$, отражающего влияние числа тарелок n .

Здесь $S = \alpha \frac{V}{R}$ — так называемый коэффициент разделения. По оси абсцисс отложено относительное время τ/τ_3 , где τ_3 — время задержки, определяемое как отношение площади, ограниченной кривой переходного процесса, к площади при установившемся значении. По оси отложено относительное отклонение $y_n/\bar{y}_n$, где $\bar{y}_n$ — новое установившееся значение концентрации в парах верхней части колонны.

Дополняя систему уравнений (7-38) — (7-40) собственно колонны уравнениями кипятильника и конденсатора, можно получить математическую модель всей ректификационной установки. При упрощенном рассмотрении примем, что кипятильник и конденсатор представляют собой сосредоточенные емкости (здесь не затрагивается механизм процессов тепло- и массообмена в этих аппаратах). Тогда уравнение для конденсатора запишется в виде

$$M_1 \frac{dx_d}{d\tau} = V(\alpha x_n + \xi) - (R + D)x_d, \quad (7-41)$$

где M_1 , x_d — масса и концентрация жидкости в конденсаторе; D — расход готового продукта.

Уравнение для кипятильника, также рассматриваемого в виде сосредоточенной емкости, имеет вид:

$$M_w \frac{dx_w}{d\tau} = -V(\alpha x_w + \xi) + (R + F)x_1 - Wx_w$$

или

$$M_w \frac{dx_w}{d\tau} = (R + F)x_1 - (V\alpha + W)x_w - V\xi, \quad (7-42)$$

где M_w , x_w — масса и концентрация жидкости в кипятильнике; W — расход отводимого кубового остатка.

Более точный учет факторов, влияющих на процесс, приводит к громоздким уравнениям, выходящим за рамки настоящего рассмотрения.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каковы недостатки экспериментальных методов определения динамических характеристик?
2. Какова формулировка закона сохранения непрерывных процессов?
3. Составьте тепловой баланс за время dt для участка dx греющего теплоносителя (теплообменник «труба в трубе»).
4. То же для нагреваемого теплоносителя.
5. Составьте структурную схему системы дифференциальных уравнений (7-1) — (7-3), представив их предварительно в конечных разностях.
6. Составьте динамические уравнения материального и теплового балансов для греющей камеры, парожидкостного пространства и поверхности нагрева выпарного аппарата. Перечислите принятые при этом предположения.
7. Какие условия должны соблюдаться при переходе от математического описания выпарного аппарата к описанию многоступенчатой выпарной установки?
8. Составьте уравнение материального баланса в динамике по летучему компоненту для одной тарелки ректификационной колонны.
9. То же для куба и конденсатора в предположении об идеальном перемешивании жидкости в них.

Глава восьмая

ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ТЕПЛОИСПОЛЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

8-1. КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсация пара — один из наиболее распространенных процессов в теплообменных и энерготехнологических установках, и поэтому аппараты, в которых происходит этот процесс, широко распространены и разнообразны по конструкции. В энергетике конденсаторы устанавливают за паровыми турбинами для увеличения перепада энтальпии рабочего пара и для сбора конденсата; в выпарной технике с помощью конденсаторов увеличивают полезные температурные перепады в выпарных аппаратах; в дистилляционных и ректификационных установках с помощью конденсаторов получают чистые продукты фракционной разгонки жидких смесей; в паровых холодильных машинах в конденсаторах ожижают и охлаждают хладагент для производства холода в испарителе; конденсаторы — обязательный элемент оборудования вакуумных установок.

Конденсация пара может осуществляться либо в поверхностных конденсаторах, либо в конденсаторах смешения.

В поверхностных конденсаторах пар конденсируется на охлаждаемой металлической поверхности и получающийся конденсат не смешивается с охлаждающей жидкостью. Такие конденсаторы применяются либо тогда, когда необходимым условием является получение чисто дистиллята, либо тогда, когда конденсат содержит химически агрессивные или токсичные вещества, сброс которых в канализацию или в водоем общественного пользования или дальнейшее применение для технических нужд представляет опасность. Поверхностные конденсаторы ставят за выпарными установками малой мощности, удобно komponуемыми на нулевой отметке, когда установка барометрических конденсаторов смешения на большой высоте связана с дополнительными затратами. В остальных случаях нашли применение более простые и дешевые конденсаторы смешения.

Для поддержания заданного вакуума или давления конденсации из конденсаторов необходимо удалять неконденсирующиеся газы. В случае применения поверхностных конденсаторов удалению подлежат газы, содержащиеся в паре и просочившиеся через неплотности установки; при применении конденсаторов смешения к указанным газам добавляется воздух, растворенный в охлаждающей воде.

Конденсат, охлаждающая вода и неконденсирующиеся газы можно удалять из конденсатора совместно или раздельно. В первом случае это достигается при помощи мокровоздушного насоса, а во втором удаление воды и конденсата производится насосами или через барометрическую трубу, а отсасывание парогазовой смеси — сухим воздушным насосом или эжектором.

Поверхностные конденсаторы бывают разных типов: кожухотрубчатые, кожухомеевиковые, секционные, двухтрубные, спиральные и с ребристыми трубами, а также однострунные — погружные и оросительные. Конструктивное многообразие поверхностных конденсаторов может серьезно отражаться на технологии изготовления аппарата, затратах материалов, удобстве эксплуатации и габаритах помещения.

Однако методика теплового расчета всех рекуперативных конденсаторов остается одинаковой и не отлича-

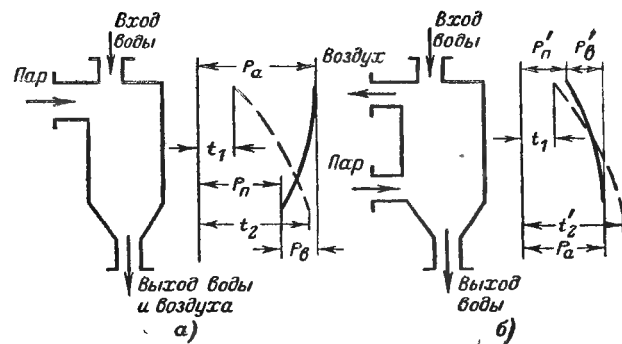


Рис. 8-1. Распределение давления и температуры по высоте прямого (а) и противоточного (б) смешительных конденсаторов.

ется от методики расчета рекуперативных теплообменников, рассмотренной в гл. 1.

Конденсаторы смешения (см. рис. 4-1 и 6-10) разделяются на прямоточные низкого уровня и противоточные — барометрические; в прямоточных потоки пара и воды направлены сверху вниз, в противоточных вода подается сверху, а пар движется снизу. Прямоточные конденсаторы дешевле по затратам на установку, но уступают противоточным по эксплуатационным расходам. На рис. 8-1 приведены диаграммы изменения давления пара и воздуха и температуры воды в прямоточном и противоточном конденсаторах. В прямоточном аппарате температура воды повышается по высоте от t_1 до t_2 , абсолютное давление по высоте не изменяется и равно p_a (рис. 8-1, а). По закону Дальтона это давление складывается из давления пара p_n и давления неконденсирующихся газов, главным образом воздуха p_b : $p_a = p_n + p_b = \text{const}$.

Если принять условно, что неконденсирующиеся газы (воздух) выделяются в конденсаторе из паров, тогда парциальное давление воздуха в прямоточном конденсаторе изменяется от 0 до $p_b = p_a - p_n$. Температура воздуха равна температуре воды на выходе из конденсатора, т. е. $t_{\text{возд}} = t''_в$.

В противоточном конденсаторе воздух отводится сверху, где парциальное давление максимально. Парциальное давление пара $p_n = p_a - p_b$ в этой части конденса-

тора наименьшее; поэтому и температура его насыщения, а следовательно, и предельная температура паровоздушной смеси на выходе из конденсатора ниже, чем в прямоточном конденсаторе. В нижней части противоточного конденсатора парциальное давление паров максимально и почти равно p_a ($p_v \approx 0$). Следовательно, их температура насыщения будет наиболее высокой, и предельная температура охлаждающей воды на выходе будет также наиболее высокая, т. е. выше, чем в прямоточном конденсаторе. Таким образом, в противоточном конденсаторе достигаются более высокий нагрев охлаждающей воды, что ведет к снижению ее расхода, и более низкая температура отсасываемой паровоздушной смеси, в результате чего снижается удельный объем этой смеси, а следовательно, и расход энергии на работу вакуум-насоса. Если учесть, что с уменьшением расхода охлаждающей воды снижается количество выделяющегося из нее воздуха, то расход энергии на отсос паровоздушной смеси в противоточном конденсаторе будет еще меньше.

Расчет конденсаторов смешения можно производить по формулам, рекомендуемым для расчета теплообменников смешения в гл. 4.

8-2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

В процессах выпаривания, перегонки, абсорбции, получения холода и во многих других технологических операциях применяют нагрев, охлаждение, регенеративный теплообмен или поддержание реакции в заданных температурных условиях жидкостей и газов. Для этого применяют различные теплообменные аппараты.

Для обработки больших количеств исходного материала применяют обычно вертикальные кожухотрубчатые теплообменники. В аппаратах с паровым обогревом пар направляют в межтрубное пространство, а обрабатываемое вещество — по трубам. При охлаждении технологического продукта предпочтительно направлять хладоноситель в трубы, а продукт в межтрубное пространство. При этом кожух аппарата служит дополнительной поверхностью охлаждения. Во всех случаях необходимо создавать благоприятные условия теплообмена: турбулентность потока, противоточность движения сред, устранение застойных зон, предотвращение отложений на поверхности теплообмена и т. д.

В последние годы в качестве вспомогательных теплообменников находят применение спиральные аппараты (см. рис. 1-8,б). В них легко достигаются высокие скорости жидкостей по обе стороны поверхности теплообмена ($1,5—2,5$ м/сек) и, следовательно, минимальное ее значение. При одинаковых скоростях теплоносителей гидравлическое сопротивление спиральных теплообменников меньше, чем в трубчатых.

В теплообменниках, предназначенных для работы с газами, затраты энергии на преодоление сил трения бывают очень велики и легко могут достигнуть величины, близкой к количеству энергии, транспортируемой газами в виде тепла. В настоящее время разработано много конструкций аппаратов с развитой гофрированной или ребристой поверхностью теплообмена, получивших название компактных теплообменников (см. рис. 1-11), которые по весу и габаритам значительно эффективнее трубчатых аппаратов. Такие аппараты рекомендуется применять для теплоносителей газ — газ и газ — жидкость. Подробная характеристика и методика расчета компактных теплообменников рассматриваются в специальной литературе [Л. 37, 63].

8-3. НАСОСЫ ДЛЯ ПЕРЕКАЧИВАНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Конденсатные насосы. Насосы для конденсата работают обычно при большом разрежении на всасывании. Абсолютное давление во всасывающем патрубке насоса должно быть выше давления насыщения, соответствующего температуре перекачиваемой жидкости. При нарушении этого условия во всасывающем патрубке происходит парообразование, и нормальная работа насоса нарушается. Для надежности в работе конденсатные насосы устанавливают ниже уровня отсасываемой жидкости в аппарате, а расстояние от этого уровня до оси насоса принимают таким, чтобы обеспечивался необходимый подпор на всасывании (не менее $0,5—0,8$ м).

Для транспортирования конденсата применяют центробежные насосы. Полный напор H_n насоса определяют по формуле

$$H_n = H_r + 10(p_n - p_k) + \Sigma h_{\text{пот}}, \text{ м вод. ст.}, \quad (8-1)$$

где H_r — высота подачи, м вод. ст.; p_n — давление в сосуде, в который нагнетается конденсат, кгс/см²; p_k —

давление в конденсаторе, кгс/см^2 ; $\Sigma h_{\text{пот}}$ — сумма потерь напора в трубопроводах и скоростных потерь на входе и выходе воды из насоса, м вод. ст. .

К. п. д. конденсатных насосов, обеспечивающих высоту всасывания до 9,5 м вод. ст. , находится в пределах 0,4—0,6.

Приближенная формула С. С. Руднева дает представление о максимально допустимой высоте всасывания $H_{\text{в,д}}^{\text{доп}}$ центробежных насосов [Л. 103]:

$$H_{\text{в}}^{\text{доп}} = B - h_{\text{в.п}} - \frac{n}{742} \sqrt{nG^2}, \text{ м вод. ст.}, \quad (8-2)$$

где B — барометрическое давление в месте установки насоса, м вод. ст. ; $h_{\text{в.п}}$ — давление насыщения водяного пара, соответствующее температуре перекачиваемой воды, м вод. ст. ; n — частота вращения насоса, об/мин ; G — производительность насоса, $\text{м}^3/\text{сек.}$

Во всех случаях при установке насосов для откачивания воды из сосудов с давлением ниже атмосферного необходимо соединять уравнильной линией паровое пространство сосуда (конденсатора, испарителя и т. д.) со всасывающей полостью насоса. Конструкции и характеристики насосов широко представлены в каталогах и в специальной литературе.

Насосы специального назначения. Их применяют для перекачивания солевых растворов, промывных вод, кислот и щелочей. Такие насосы изготавливают из коррозионностойких материалов — ферросилида, нержавеющей сталей, керамики или пластмасс.

Консольные насосы типа КНЗ, ХНЗ, ЯНЗ и ЭИНЗ применяют для перекачивания кислот и щелочей, не содержащих взвешенных частиц. Эти насосы изготавливают из коррозионностойких сталей (К — железокремнистый сплав С-15; Х — хромистая сталь Х28; Я — нержавеющая сталь Х18Н9Т; ЭИ — нержавеющая жароупорная сталь ЭН432; Н — насос; З — условное обозначение конструкции насоса [Л. 42]).

Для перекачивания густых, волокнистых и загрязненных кислот, гидромассы и пульпы применяют центробежные одноступенчатые насосы типа ЭХМ-20.

Водоаммиачные насосы. Для перекачивания растворов в абсорбционных холодильных машинах применяют герметичные центробежные насосы типа ЦНГ.

Детали насоса, соприкасающиеся с жидкостью, выполняют из легированных сталей Х18Н12М3Т или Х18Н9Т. Эти насосы не имеют сальников; их конструкция не приспособлена для перекачивания жидкостей с загрязнениями в виде твердых частиц, так как при этом возможны задиры вала и выход из строя подшипников. Поэтому на всасывающей стороне насоса устанавливают надежный фильтр. Подпор к насосу должен быть не менее 2,5 м столба перекачиваемой жидкости. Конструкции и характеристики водоаммиачных насосов — см. [Л. 10].

Мощность на валу центробежного насоса определяют по формуле

$$N = \frac{GH}{3600 \cdot 102 \gamma \eta_n}, \text{ квт}, \quad (8-3)$$

где G — производительность насоса, кг/ч ; H — напор, создаваемый насосом, м ; γ — удельный вес жидкости, кг/м^3 ; η_n — к.п.д. насоса (0,6—0,8).

Монтежю. Для транспорта и эвакуации из сосудов агрессивных жидкостей иногда применяют пневматическое устройство — монтежю — вертикальный или горизонтальный резервуар, в который жидкость подается самотеком и вытесняется сжатым воздухом (рис. 8-2). Для заполнения корпуса 1 жидкостью открывают кран-воздушник 6 и кран 2 на трубопроводе с жидкостью; перед передавливанием жидкости краны 2 и 6 закрывают и открывают кран 5 на нагнетательной трубе 7, после чего через кран 3 подают сжатый воздух для вытеснения жидкости. По окончании передавливания закрывают кран 3 и соединяют монтежю с атмосферой.

Давление p , необходимое для удаления жидкости, можно определить по формуле

$$p = h_n \gamma + \frac{\gamma \omega^2}{2g} (1 + \Sigma \xi) + p_0, \text{ кгс/м}^2. \quad (8-4)$$

Скорость протекания жидкости ω при заданном давлении в монтежю равна:

$$\omega = 4,43 \sqrt{\frac{p - p_0 - h_n \gamma}{\gamma (1 + \Sigma \xi)}}, \text{ м/сек}, \quad (8-5)$$

где h_n — высота поднятия жидкости, м ; γ — удельный вес жидкости, кг/м^3 ; $\Sigma \xi$ — сумма всех коэффициен-

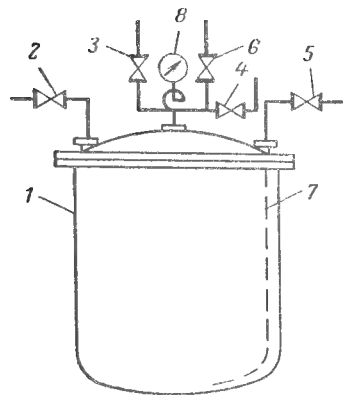


Рис. 8-2. Монтежю.

1 — корпус; 2, 3, 4, 5 — краны; 6 — край-воздушник; 7 — нагнетательная труба; 8 — манометр.

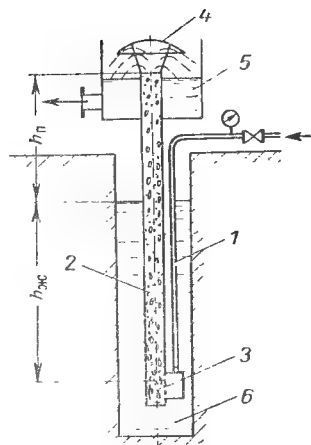


Рис. 8-3. Эрлифт (воздушный подъемник).

тов сопротивлений нагнетательного трубопровода; p_0 — давление в монтежю, кгс/м^2 .

Максимальная производительность монтежю 40—45 $\text{м}^3/\text{ч}$.

Достоинством монтежю является отсутствие сложных и движущихся узлов, недостатками — громоздкость, низкий к.п.д. и периодичность работы.

Эрлифты (воздушные подъемники). Для перекачивания солевой пульпы в выпарных установках и в других аналогичных случаях применяют воздушные подъемники — эрлифты (рис. 8-3). По трубе 1 через смеситель 3 сжатый воздух подводится снизу к подъемной трубе 2 и барботирует в жидкости в виде пузырьков. Плотность смеси жидкости и воздуха в подъемной трубе меньше, чем жидкости, окружающей эту трубу. Поэтому по принципу сообщающихся сосудов смесь поднимается по трубе выше уровня в емкости 6. На выходе из трубы 2 смесь огибает зонти-отражатель 4; при этом из смеси выделяется воздух, а жидкость сливается в приемный резервуар 5.

Необходимым условием для работы эрлифта является соблюдение неравенства

$$\frac{\gamma_{\text{ж}}}{\gamma_{\text{эм}}} > \frac{h_{\text{ж}} + h_{\text{п}}}{h_{\text{ж}}}, \quad (8-6)$$

где $\gamma_{\text{ж}}$ и $\gamma_{\text{эм}}$ — удельные веса жидкости и эмульсии, кг/м^3 ; $h_{\text{ж}}$ и $h_{\text{п}}$ — глубина погружения смесителя и высота поднятия жидкости, м.

Отношение $\zeta = \frac{h_{\text{ж}}}{h_{\text{ж}} + h_{\text{п}}}$ называется коэффициентом подъема эрлифта. При высоте подъема воды 6—30 м $\zeta = 0,65 \div 0,7$. Расход воздуха $V_{\text{в}}$ для подъема 1 м^3 воды на высоту $h_{\text{п}}$ можно определить по формуле

$$V_{\text{в}} = \frac{1,75 h_{\text{п}}}{C \lg \frac{h_{\text{ж}} + h_{\text{п}}}{10}}, \quad (8-7)$$

где коэффициент $C = f(\zeta)$ имеет значения:

ζ	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
C	13,9	13,6	13,1	12,4	11,5	10,6	9,6

Проходное сечение подъемной трубы эрлифта должно быть таким, чтобы скорость эмульсии вблизи смесителя была не меньше 2,7 м/сек , а на выходе из трубы — около 7 м/сек .

Воздушные подъемники просты по конструкции и надежны в эксплуатации, особенно при повышенных температурах, когда условия для работы центробежных насосов становятся тяжелыми. Вместе с тем к.п.д. эрлифта низок (25—30%), производительность его невелика, и для его работы необходим сжатый воздух.

8-4. КОНДЕНСАТООТВОДЧИКИ

Быстрый отвод конденсата из паропотребляющих аппаратов необходим для обеспечения высокой теплопроизводительности, а из паропроводов — для предотвращения гидравлических ударов и связанных с ними повреждений. Автоматическое удаление конденсатора без пропуска пара осуществляется посредством специальных устройств — конденсатоотводчиков, которые можно разделить на четыре группы [Л. 69].

Первая группа — поплавковые конденсатоотводчики с открытым сверху (рис. 8-4,а) или снизу цилиндрическим поплавком. Принцип их работы основан на различии плотностей пара и конденсата. Отвод конденсата периодический.

Вторая группа — поплавковые конденсатоотводчики с герметически закрытым, полым шарообразным поплав-

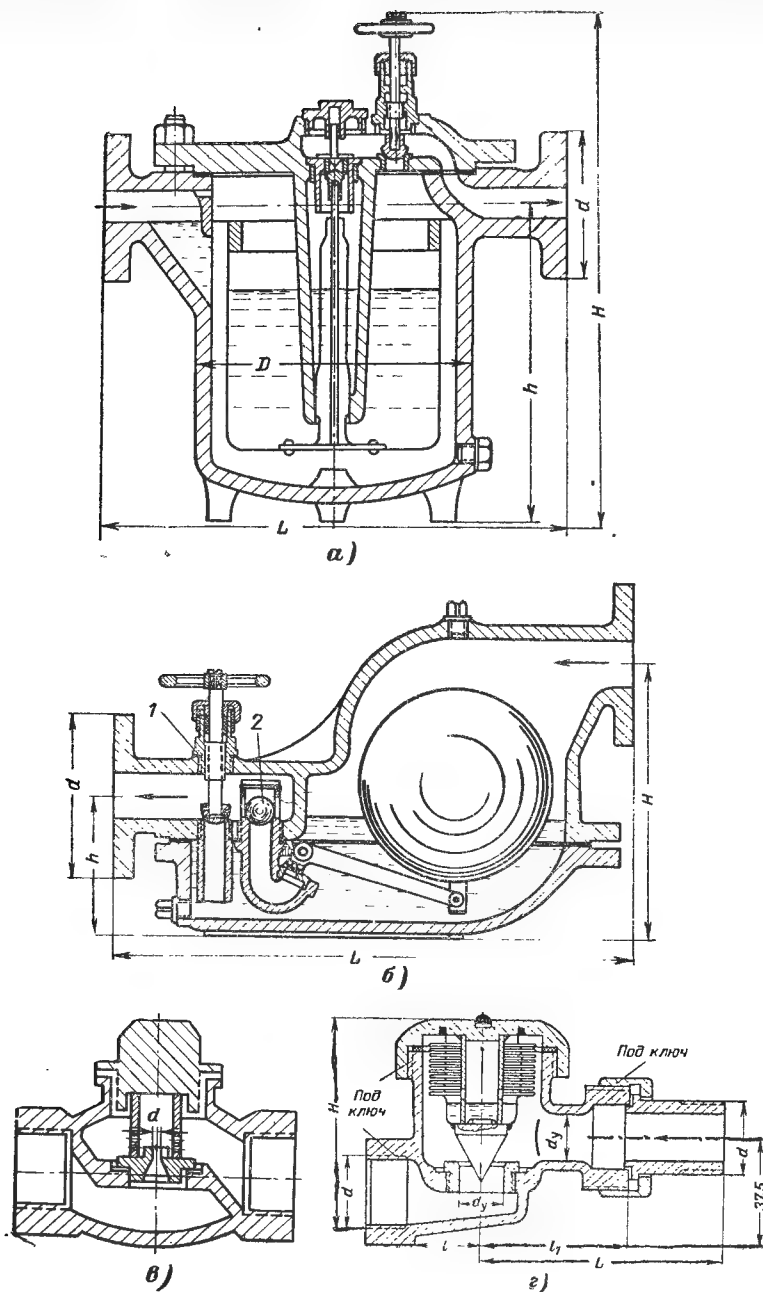


Рис. 8-4. Конденсатоотводчики.

а — с открытым поплавком и с двойным клапаном типа КСВ (I группа);
 б — с закрытым поплавком и с шиберным затвором типа Т-200 (II группа);
 1 — обводной клапан; 2 — обратный клапан; в — односплошной типа ЗИЛ (III группа); г — термостатический типа ЦКБА (IV группа).

ком и с золотниковым или шиберным затвором (рис. 8-4,б). Принцип их работы такой же, как и приборов первой группы, но отвод конденсата непрерывный.

Третья группа — сопловые конденсатоотводчики с однократным и многократным расширением пара (рис. 8-4,в). Принцип их работы основан на различии удельных объемов пара и конденсата при истечении через сопловой насадок. Отвод конденсата непрерывный.

Четвертая группа — термостатические конденсатоотводчики с низкокипящими жидкостями в герметически закрытой пружинящей емкости, при кипении которых приходит в движение клапан золотникового затвора (рис. 8-4,г). Принцип работы таких устройств основан на расширении тел от нагревания и на разности температур пара и конденсата. Отвод пара периодический.

подавляющее большинство конденсатоотводчиков сконструировано для вполне определенных давления и температуры пара. Так, отводчики первой группы — до 13 ат; отводчики второй группы с золотниковым затвором — до 32 ат, а с шиберным затвором — до 100 ат; отводчики третьей группы — до 13 ат (предельно — до 25 ат); отводчики четвертой группы изготовляют для диапазонов давления пара 0,05—0,9 и 0,9—7 ат.

Следует различать максимальную и фактическую производительность конденсатоотводчиков по пропускаемой жидкости.

Максимальная производительность конденсатоотводчиков определяется по охлажденному конденсату, не подверженному вторичному вскипанию, и может быть найдена не только путем испытаний, но и теоретически — расчетным путем:

для истечения жидкости из отверстия любой формы

$$G = \alpha \varphi f \sqrt{2g\gamma H}, \text{ кг/сек;} \quad (8-8)$$

для истечения воды из круглого отверстия

$$G = 0,01252 \mu d^2 \sqrt{\gamma \Delta p}, \text{ кг/сек,} \quad (8-9)$$

где G — количество вытекающей жидкости, кг/сек; α — коэффициент сжатия струи; φ — коэффициент скорости; f — площадь отверстия истечения, м^2 ; $g = 9,81$ — ускорение силы тяжести, м/сек^2 ; $\mu =$

Таблица 8-1

Значение коэффициента запаса *k*, принимаемого при подборе конденсатоотводчиков

Тип конденсатоотводчика	Коэффициент запаса <i>k</i> при давлении пара	
	до 2 ат	свыше 2 ат
С открытым поплавком (I группа)	3,5	4
и термостатическое (IV группа)		
С закрытым поплавком (II группа)	2,5	3
Сопловые (III группа)	3	3,2
С опрокинутым поплавком (I группа)	2	2,5

Таблица 8-2

Минимальный перепад давления в конденсатоотводчиках

Тип конденсатоотводчика	Группа	Перепад давлени-я, ат
Поплавковый	I	0,25
Поплавковый	II	0,10
Односопловый	III	0,10
Многосопловый (лабиринтный)	III	0,15
Термостатический	IV	0,05

=αφ — коэффициент расхода, определяемый только путем испытаний; γ — удельный вес жидкости; для воды принято γ=1 000 кг/м³; *H* — давление, под действием которого происходит истечение, кгс/м²; Δ*p* — перепад давлений до и после затвора отводчика, кгс/м².

Фактическая производительность определяется действительной часовой производительностью отводчиков в литрах перегретого конденсата, имеющего температуру выше температуры насыщения при давлении истечения и частично превращающегося в пар в дроссельном органе. Действительное давление и действительную температуру в зоне истечения измерить нельзя. Поэтому при установлении фактической производительности отводчиков всегда предусматривают определенный коэффициент запаса.

Таблица 8-3

Производительность и размеры конденсатоотводчика типа KSB

Наименование	Перепад давления пара, кгс/см²	Номер отводчика и его условный проход <i>d</i> , мм							
		00	0	1	2	3	4	5	6
		13	15	20	25	32	40	50	60
Максимальная производительность, л/ч	13	280	500	900	1 300	2 100	2 900	5 300	8 700
	8	330	615	1 100	1 600	2 600	3 550	6 300	10 000
	3	330	740	1 320	2 060	3 490	5 270	8 250	12 850
Размеры отводчика, мм (по рис. 8-4, а)	<i>D</i>	130	165	195	225	275	300	360	400
	<i>L</i>	190	225	260	295	350	385	440	480
	<i>H</i>	270	285	310	355	365	385	480	510
	<i>h</i>	135	145	170	205	215	230	280	295
	<i>d</i>	95	100	105	115	140	150	165	175
Вес, кг		8	10	14	21	32	41	63	76

Примечания: 1. Значение фактической производительности с учетом перегрева конденсата в 3—4 раза меньше максимальной.
2. Значения производительности, приведенные в таблице, определены по холодной воде при противодавлении, равном нулю.

Таблица 8-4

Производительность и размеры конденсатоотводчика типа Т-200

Наименование	Перепад давления пара, кг/см ²	Номер отводчика и его условный проход d_y , мм						
		00	0	1	2	3	4	5
		13	15	20	25	32	40	50
Максимальная производительность, л/ч	0,1	140	160	210	260	420	510	650
	0,2	190	230	300	360	580	720	930
	0,5	310	370	480	590	940	1660	1480
	1	430	520	670	820	1310	1630	2070
	2	620	740	960	1170	1880	2320	2950
	3	740	890	1150	1410	2250	2800	3600
	4	870	1050	1340	1640	2620	3250	4200
	5	950	1160	1480	1820	2900	3600	4600
	7	1140	1370	1770	2170	3460	8300	5500
	10	1000	1230	1510	1950	3050	3800	5010
	12	870	1130	1260	1780	2660	3420	4600
	15	740	980	1220	1610	2340	2880	3920
	20	550	650	980	1430	1640	2140	2400
	32	450	550	650	820	1310	1710	1900
Размеры отводчика, мм (по рис. 8-4, б)	d	70	80	95	110	120	140	160
	L	240	250	283	300	332	370	415
	h	64	69	77	83	89	98	105
	H	134	143	165	178	211	226	237

Примечание. При учете отвода перегретого конденсата значения фактической производительности в 3 раза меньше указанных в таблице.

По опытным данным фактическая производительность в 2—4 раза меньше максимальной и может быть определена по формуле

$$V_{\phi} = V_{\text{м}} k, \quad (8-10)$$

где $V_{\text{м}}$ — максимальный расчетный расход конденсата, л/ч; k — коэффициент запаса, зависящий от типа отводчика и перепада давлений.

Значения коэффициента запаса k приведены в табл. 8-1.

Минимальные перепады давлений, производительность и размеры некоторых конденсатоотводчиков приведены в табл. 8-2 — 8-6.

Таблица 8-5

Пропускная способность односопловых конденсатоотводчиков типа ЗИЛ (без обратного клапана)

Диаметр отверстия, мм	Количество конденсата (кг/ч) при перепаде давлений пара, кгс/см ²								
	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Минимальное количество конденсата									
0,5	6,8	15,5	27,5	36,5	52,0	71,3	94	118	146
1,0	9,7	21,9	39,0	55,9	74,3	100	132	167	206
1,5	11,8	26,7	47,0	62,7	93,5	122	160	204	250
2,0	11,8	31,0	52,5	70,2	105,8	143	186	237	292
2,5	15,3	34,6	61,5	85,1	117,3	156	208	263	325
3,0	16,8	38,0	67,6	89,7	128,8	175	228	283	357
3,5	18,2	40,6	72,8	96,6	139,1	189	247	313	384
4,0	19,4	43,7	77,6	103,5	149,3	201	265	336	413
4,5	20,6	46,3	82,8	107,0	156,4	214	280	352	437
5,0	21,7	49,0	86,9	115,0	167,0	227	295	370	460

Максимальное количество конденсата

0,5	27,5	62,1	110	146	210	285	374	473	582
1,0	38,7	87,8	156	226	297	403	529	669	824
1,5	47,4	107	189	250	374	491	642	812	1000
2,0	55,2	124	210	280	420	573	747	948	1169
2,5	61,4	138,5	245	339	469	638	833	1054	1305
3,0	67,4	152	270	357	515	700	915	1156	1432
3,5	72,8	164	290	386	557	755	990	1251	1545
4,0	77,8	175	310	413	493	808	1058	1338	1650
4,5	82,7	186	331	439	629	858	1120	1410	1752
5,0	87,2	196	348	462	667	905	1180	1495	1842

Примечание. Пропускная способность сопловых конденсатоотводчиков типа ЗИЛ с обратным клапаном принимается по этой же таблице с введением коэффициента 0,9.

Таблица 8-6

Производительность и размеры конденсатоотводчика
типа 45кч66р ЦКБА

Наименование	Перепад давле- ния пара, кг/см ²	Условный проход d_y отводчика, мм	
		15	20
Максимальная произ- водительность, л/ч	0,1	165	250
	0,3	280	440
	0,5	350	560
	0,7	430	660
	0,9	500	750
	1	560	850
	3	680	900
	5	900	1150
	6	1000	1300
Размеры, мм (по рис. 8-4, е)	d	$1/2''$	$3/4''$
	H	79	79
	L	81	81
	l	40	40
	l_1	92	92
	S_1	24	24
	S_1	58	58
Вес, кг	—	0,89	0,89

Примечание. Данные о производительности указаны при избыточном давлении после отводчика, равном нулю.

8-5. БРЫЗГООТДЕЛИТЕЛИ

Качество пара, образующегося в испарителях, паро-преобразователях, выпарных и некоторых других аппаратах, определяется не только давлением и температурой, но и содержанием в нем капельной влаги. При правильном выборе размеров парового пространства паропроизводящего аппарата унос брызг кипящей жидкости с вторичным паром практически должен отсутствовать.

В испарителях и выпарных аппаратах напряжение зеркала испарения не должно превышать $1500—2500 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, а напряжение парового объема $1500—3000 \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$. Однако с целью уменьшения габаритов парового пространства, особенно в аппаратах

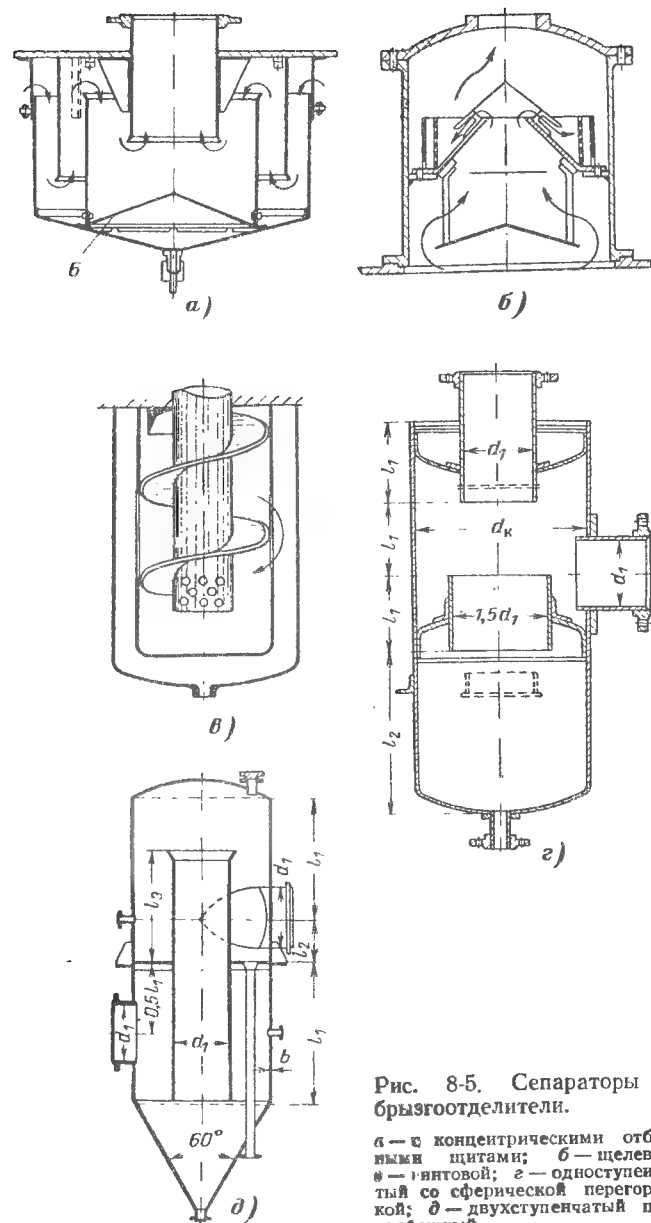


Рис. 8-5. Сепараторы и брызгоотделители.

а — с концентрическими отбойными щитами; б — щелевой; в — ринтовой; г — одноступенчатый со сферической перегородкой; д — двухступенчатый центробежный.

Таблица 8-7

Производительность и размеры выносных брызгоотделителей
(рис. 8-5, *г* и *д*)

Произ- води- тель- ность по па- ру, т/ч	Давление пара в брызгоотделителе									
	0,1 ат					0,2 ат				
	d_k	d_1	l_1	l_2	l_3	d_k	d_1	l_1	l_2	l_3

Одноступенчатые брызгоотделители

1	1,00	0,40	0,50	0,40	0,8	0,75	0,30	0,40	0,30	0,60
2	1,50	0,50	0,60	0,50	1,0	1,00	0,40	0,50	0,40	0,80
4	2,00	0,75	1,00	0,70	1,0	1,50	0,50	0,60	0,50	1,00
6	2,25	0,75	1,00	0,70	1,0	1,75	0,50	0,60	0,60	1,00
8	3,00	1,00	1,25	1,00	1,5	2,00	0,75	0,90	0,70	1,25

Двухступенчатые брызгоотделители

1	1,00	0,50	1,00	0,40	0,90	0,75	0,35	0,70	0,30	0,65
2	1,40	0,60	1,20	0,50	1,00	1,00	0,50	1,00	0,40	0,90
4	2,00	0,80	1,60	0,70	1,40	1,40	0,60	1,20	0,50	1,00
6	2,25	0,80	1,60	0,70	1,40	1,75	0,70	1,40	0,60	1,30

с большой поверхностью нагрева (1000 м² и более), на практике приходится допускать работу испарительных установок при больших напряжениях парового объема, что неизбежно приводит к выходу вторичного пара с некоторым содержанием влаги. Возможны также периодические забросы брызг жидкости в паровое пространство аппарата и в паропровод вторичного пара вследствие неизбежных колебаний давления.

Для обеспечения сухости вторичного пара над паровым пространством внутри или за пределами паропроизводящего аппарата часто ставят специальные устройства — брызгоотделители. Конструкции брызгоотделителей разнообразны, но принцип их работы основан на использовании объемных сил (центробежной и силы тяжести) и прилипания капель к стенке. Установлено, что если влажный пар движется со скоростью 15—20 м/сек и встречает, на своем пути два-три достаточно крутых поворота, то он легко осушается до 1,0—0,3%. За поворотом скорость пара не должна превышать 5 м/сек. Снижения скорости пара достигают соответствующим увеличением проходного сечения в брызгоотделителе.

На рис. 8-5 показаны некоторые типы брызгоотделителей, встраиваемых в паровое пространство аппаратов (рис. 8-5, *а* — *в*), и выносных, устанавливаемых на паропроводе рядом с паропроизводящим аппаратом (рис. 8-5, *г*, *д*). Рекомендуемые размеры последних приведены в табл. 8-7.

8-6. УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ ЖИДКИХ СИСТЕМ

Отстойники. Осаждение твердой фазы из суспензии под действием силы тяжести твердых частиц называется отстаиванием. Его можно производить периодически, непрерывно или комбинированно. При периодическом отстаивании суспензию заливают в аппараты (отстойники) и оставляют в состоянии покоя в течение некоторого времени, достаточного для оседания частиц на дно аппарата. После отстаивания осветленный слой жидкости сливают через сифон, расположенный выше уровня осевшего осадка (декантируют), а осадок удаляют через нижний спускной кран. В непрерывно действующих отстойниках подача суспензии, а также удаление осадка и осветленной жидкости производятся непрерывно.

Производительность отстойника V по осветленной жидкости при заданной поверхности осаждения F , м² определяется из соотношения

$$V = \frac{Fh}{\tau}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (8-11)$$

При заданной высоте слоя жидкости h продолжительность отстаивания τ зависит от скорости осаждения w , м/сек:

$$\tau = \frac{h}{3600w}, \text{ ч}. \quad (8-12)$$

Объединяя формулы (8-11) и (8-12), получаем:

$$V = 3600 wF, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (8-13)$$

Таким образом, производительность отстойника не зависит от его высоты и определяется только скоростью осаждения и свободной поверхностью жидкости в отстойнике. Размеры и формы отстойника для периодического отстаивания зависят от концентрации суспензии, скоро-

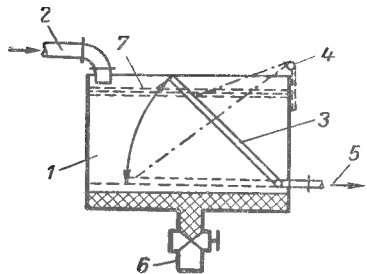


Рис. 8-6. Отстойник периодического действия.

1 — корпус; 2 — наполнительная труба; 3 — подвижный сифон; 4 — цепь; 5 — выход осветленной жидкости; 6 — вывод шлама; 7 — уровень заполнения.

жении подвижного сифона 3. Такие отстойники работают группами по 6 шт. и более. В то время как некоторые из них разгружаются, в других идет отстаивание. Для уменьшения площади, занимаемой отстойниками, иногда устанавливают многоярусные аппараты, состоящие из нескольких емкостей, расположенных по вертикали один над другим [Л. 33, 65].

Фильтрующие аппараты. Фильтрация служит для разделения суспензий на осадок и жидкий фильтрат и относится к самым распространенным процессам в производстве химических продуктов. Процесс фильтрации основан на задержании твердых взвешенных частиц пористыми перегородками.

По структуре фильтрующей перегородки фильтры бывают трех типов: с зернистой перегородкой, с тканевой перегородкой и с жесткой перегородкой. По способу создания и величине напора, под действием которого суспензия движется через поры перегородки, различают: а) фильтры, работающие под действием гидростатического давления фильтруемой жидкости; б) вакуум-фильтры, работающие под действием вакуума, создаваемого вакуум-насосами; в) фильтр-прессы, работающие под давлением, создаваемым насосами или компрессорами [Л. 65].

Центрифуги. Центрифуги широко применяют для осветления жидкостей и для обезвоживания кристаллизующихся продуктов. В центрифугах суспензии разделя-

сти осаждения и продолжительности отдельных периодов процесса. Скорость осаждения возрастает с увеличением размеров частиц и с повышением температуры суспензии, т. е. при уменьшении ее вязкости.

Схема отстойника периодического действия приведена на рис. 8-6. Разгрузка осадка производится через задвижку 6 в нижнюю трубу. Осветленный раствор удаляется постепенно при пони-

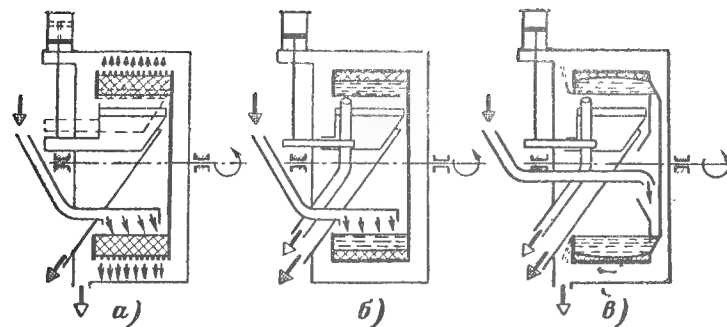


Рис. 8-7. Схемы работы центрифуг.

а — с перфорированным барабаном; б — с глухим барабаном отстойного действия; в — с глухим барабаном переточного действия.

ются под действием центробежной силы. Основным элементом всякой центрифуги служит барабан, вращающийся с большой скоростью на вертикальном или горизонтальном валу.

В центрифугах смеси можно разделять либо по принципу фильтрования (кристаллы), либо по принципу отстаивания (коллоидные шламы, пасты, аморфные остатки.) В первом случае применяют центрифуги с дырчатыми (перфорированными) барабанами (рис. 8-7,а), во втором — со сплошными (глухими) барабанами (рис. 8-7,б). Влажность отфильтрованного продукта находится в пределах 3—5%, а осажденного 50—80%. К разновидности центрифуги со сплошным барабаном относится переточная машина, схематически показанная на рис. 8-7,в. Эта центрифуга применяется в случаях, когда суспензия не способна фильтроваться, но твердые частицы быстро отделяются под действием центробежной силы, а осветленная жидкость может быстро удаляться через край барабана.

Эффект центрифугирования зависит от степени увеличения инерционных сил и силы тяжести. Характеристикой этой степени служит фактор разделения — отношение центробежной силы к силе тяжести. Фактор разделения может быть выражен так же, как отношение ускорения центробежной силы к ускорению силы тяжести:

$$\Phi = \frac{a^2}{r} \cdot \frac{1}{g}, \quad (8-14)$$

где Φ — фактор разделения; ω^2/r — ускорение центробежной силы, $м/сек^2$; g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$.

Фактор разделения может быть выражен также через угловую скорость ω ; так как $\omega = \omega r$, то

$$\Phi = \frac{\omega^2 r}{g} \quad (8-15)$$

Из уравнений (8-14) и (8-15) следует, что увеличение фактора разделения легче достигается повышением угловой скорости (т. е. увеличением числа оборотов), чем увеличением радиуса барабана центрифуги. В зависимости от величины фактора разделения центрифуги делят на две группы: нормальные ($\Phi < 3000$) и сверхцентрифуги ($\Phi > 3000$).

Современные промышленные центрифуги изготовляют нескольких конструкций: вертикально-подвесные, трехколесные с верхней ручной выгрузкой, автоматические горизонтальные непрерывного действия и отстойные со шнековой выгрузкой осадка. Их характеристики широко представлены в каталогах химического оборудования [Л. 65].

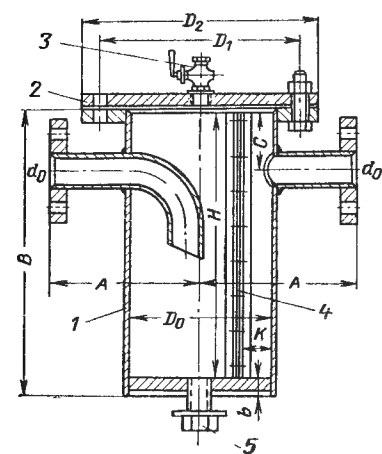


Рис. 8-8. Грязевик.

1 — корпус; 2 — крышка; 3 — воздушный кран; 4 — медная сетка (25 отверстий на $1 см^2$); 5 — пробка для спуска грязи.

Грязевики. Чистые жидкости (конденсат, питательная и циркуляционная вода, растворы, рассолы и др.) неизбежно засоряются в технологических аппаратах и трубопроводах солевыми отложениями, набивочными и уплотнительными материалами, ржавчиной и другими механическими взвесями. При транспортировке таких жидкостей на значительные расстояния отстой необходимо отделять от них не только путем дренирования аппаратов и хранилищ, но и в про-

Размеры и вес грязевиков

Условный проход d_0 , мм	Корпус грязевика, мм							Сетка		Вес, кг
	D_0	D_1	D_2	A	B	C	b	H	K	
25	150/159	240	285	180	309	69	10	297	30	33
40	203/216	295	340	218	409	89	15	385	45	59
50	252/267	355	405	254	461	101	15	436	50	79
70	309/325	410	460	293	513	123	18	487	76	111

цессе следования жидкостей в трубопроводах. Для отделения шлама от жидкости на трубопроводах устанавливают грязевики. Одна из конструкций грязевиков показана на рис. 8-8; в табл. 8-8 приведены основные размеры грязевиков по условному проходу трубопровода.

8-7. КОНДЕНСАТНЫЕ БАКИ И ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ЕМКОСТИ

На предприятиях с большим количеством теплопотребляющих цехов и с разветвленной сетью теплопроводов сооружают станции для сбора конденсата и перекачные станции для транспортировки горячей воды, технологических материалов и готового продукта.

На конденсатных станциях рекомендуется устанавливать по два конденсатных бака с 0,5—1-часовым запасом для стока. При условии автоматизации откачки конденсата емкость баков может быть снижена до 15-минутного запаса.

Баки изготовляют в виде параллелепипедов (рис. 8-9, а) и цилиндров (рис. 8-9, б). На расстоянии 0,8 высоты бака от пола должен быть предусмотрен переливной патрубок в дренаж. Закрытые баки должны быть снабжены манометрами и предохранительными клапанами. Как и всякая емкость для жидкости, конденсатные баки имеют указатели уровня, патрубки на дне для спуска при промывке и отверстия для воздушной трубы. При двух и более баках между ними следует устанавливать перемычки для выравнивания уровня и давления: при открытых баках — одну перемычку внизу, при закрытых баках — две: одну по паровому объему, другую по объему жидкости. Если выпар из баков не

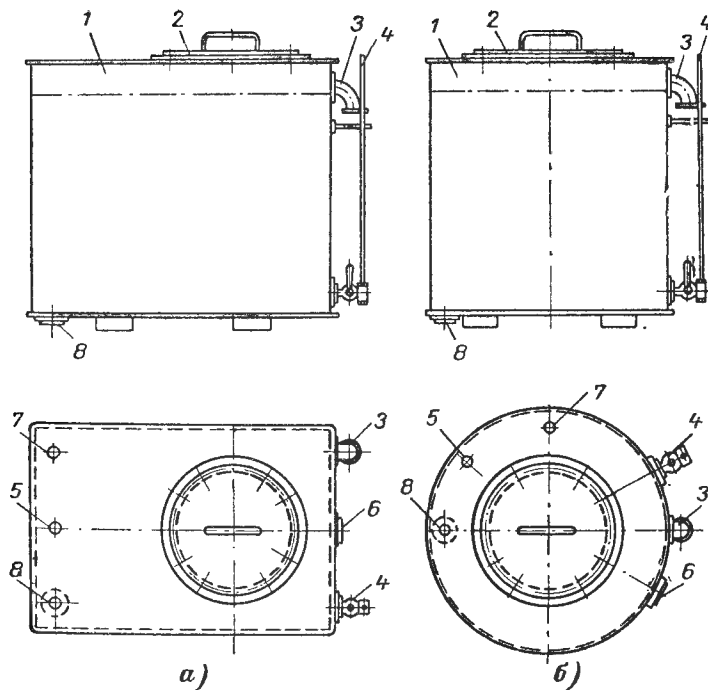


Рис. 8-9. Конденсатные баки.

a — прямоугольный; *б* — круглый; 1 — корпус; 2 — лаз; 3 — переливная труба; 4 — водомерное стекло; 5 — отверстие для конденсатной трубы; 6 — патрубок к насосу; 7 — отверстие для воздушной трубы; 8 — фланец спускной трубы.

может быть использован, то на трубе, сообщающей бак с атмосферой, устанавливают специальный воздушный или водяной охладитель для конденсации вторичного и пролетного пара.

В технологических производствах для согласования работы технологических установок и цехов, снабжающих эти установки жидкими растворами, смесями, суспензиями и т. п., устанавливают промежуточные емкости и хранилища. Емкость хранилища рассчитывают из условия хранения 2—3-суточного запаса исходного материала. Хранилища представляют собой шаровидные или вертикальные цилиндрические резервуары, устанавливаемые на открытом воздухе и защищенные при необходимости покрытиями, служащими для сниже-

ния тепловых потерь, для ослабления перегрева от солнца или для защиты от коррозии.

Из резервуаров-хранилищ исходную жидкость перекачивают в расходные баки, размещаемые обычно вблизи технологических установок (выпарные станции, ректификационные колонны, абсорберы). Емкость расходных баков выбирают из условия обеспечения 10—15-минутной работы установки при максимальной нагрузке.

На выпарных станциях, оборудованных двухстадийными выпарными установками, между первой и второй стадиями упаривания устанавливают обычно промежуточные емкости. Размеры этих емкостей рассчитывают из условия обеспечения 2—3-часовой работы первой стадии выпарки при промывке или при вынужденной остановке аппаратов второй стадии.

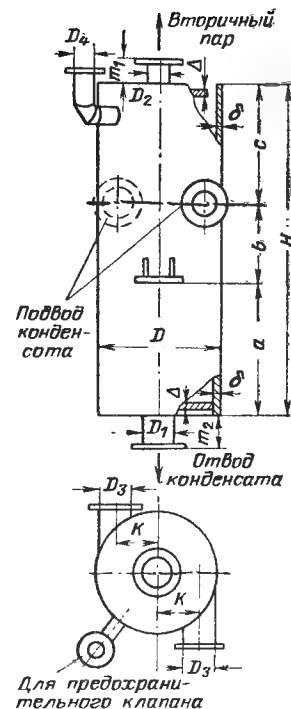


Рис. 8-10. Расширительный бачок конструкции Теплоэлектропроекта.

8-8. РАСШИРИТЕЛЬНЫЕ БАЧКИ-СЕПАРАТОРЫ

Расширительные бачки-сепараторы устанавливают на пути конденсата от пароприемников к сборным бакам. Назначение расширителей — разгрузить внутрицеховые конденсатопроводы большой протяженности от пара вторичного вскипания. На рис. 8-10 показан расширительный бачок конструкции Теплоэлектропроекта. К одному расширителю можно присоединять несколько пароприемников. Число входных конденсатных патрубков в каждом расширительном бачке должно соответствовать числу ступеней давления пара, потребляемого пароприемниками, конденсат из которых отводится в расширительный бачок.

Таблица 8-9

Основные размеры расширительных бачков конструкции
Теплоэлектропроекта, мм

$V, \text{м}^3$	H	a	b	c	D	D_1	D_2
0,05	650	250	130	270	325	76	44
0,125	1 000	400	200	400	426	89	57
0,25	1 200	500	200	200	529	133	89
0,5	1 700	700	400	600	630	159	108
0,7	1 400	600	250	550	820	219	133
1,0	2 000	1 000	300	700	820	219	133

Продолжение

$V, \text{м}^3$	D_2	D_4	k	m_1	m_2	δ	Δ
0,05	76	57	110	80	80	8	12
0,125	108	57	145	80	100	9	14
0,25	133	57	185	150	150	9	16
0,5	159	89	215	100	150	9	16
0,7	219	89	270	150	150	9	20
1,0	273	89	255	150	150	9	20

Объем бачков V рекомендуется выбирать из расчета 1 м³ бачка на 2000 м³/ч сепарируемого пара или по формуле

$$V = 0,5 vxG, \text{м}^3, \quad (8-16)$$

где v — удельный объем пара, м³/кг; x — весовое содержание пара в долях единицы; G — расход конденсата, т/ч.

Водяное пространство бачка должно составлять 20% общего объема. Скорость пара в сепараторе не должна превышать 2 м/сек, а конденсата — 0,25 м/сек. В табл. 8-9 приведены основные размеры расширительных бачков конструкции Теплоэлектропроекта.

8-9. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ ПАРА

Из паровых молотов и прессов, а также из насосов с паровым приводом выходит пар с параметрами: $p = 1,3-1,5 \text{ ат}$, $t_n = 105-110^\circ \text{С}$. С таким же давлением

может быть получен вторичный пар из выпарных аппаратов, конденсаторных баков и т. п. Одним из основных препятствий к использованию такого пара является часто его загрязненность маслом (до 300 мг/кг), остатками уплотнительного материала, кристаллами солей и другими веществами, что приводит к загрязнению поверхности нагрева паропотребляющих аппаратов, а также конденсата, делая его непригодным для питания парогенераторов. В практике нашли применение различные способы очистки пара: механическая, с помощью паропромывателей и др.

При выборе устройства для очистки пара необходимо учитывать допускаемые нормы содержания масла, солей и других загрязнений, зависящие от цели дальнейшего использования пара. Практикой использования отработавшего пара установлено, что устройство индивидуальных очистителей пара у машин менее целесообразно, чем устройство их на общих магистральных паропроводах.

Одна из конструкций набивкоуловителя показана на рис. 8-11. Отделение набивки от пара основано на резком изменении направления потока пара при одновременном резком снижении его скорости. Корпус 1 аппарата выполнен из металла в виде цилиндра, через верхнюю крышку которого пропущена пароподводящая труба 2. Диаметр корпуса в 3,5—4 раза больше диаметра паропровода. Скорость пара в пароподводящей трубе должна быть не более 30 м/сек. Во избежание закупоривания набивкой патрубка для отвода конденсата 6 к днищу приварена труба с отверстиями 3, защищенная

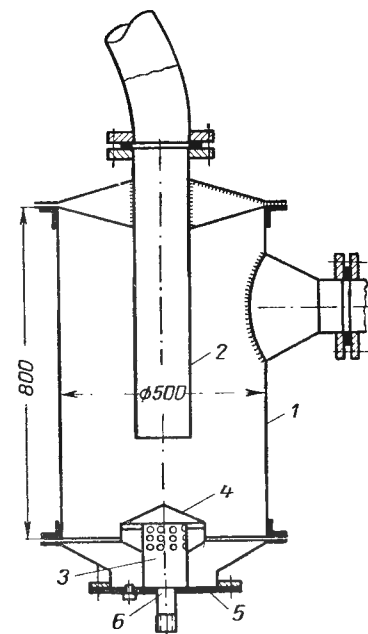


Рис. 8-11. Набивкоуловитель.

сверху, конусным колпачком 4. Аппарат очищают через люк с глухим съемным фланцем 5. Объем набивкоуловителя принимают из расчета 3,7—4 т/ч пара на 1 м³ цилиндрической части аппарата. Потеря давления пара в набивкоуловителе составляет 0,05—0,07 ат. Высоту аппарата принимают равной 4—6 диаметрам паропроводящей трубы $d_{тр}$, который определяют по формуле

$$d_{тр} = 3,76 \sqrt{\frac{G}{\gamma}}, \text{ мм}, \quad (8-17)$$

где G — количество очищаемого пара, кг/ч; γ — удельный вес пара, кг/м³.

Диаметр корпуса набивкоуловителя согласовывается с диаметром паропроводящей трубы.

Очистка пара от масла в маслоотделителях механического действия основана на различии плотностей водяного пара и масла и на способности масла прилипать к металлическим поверхностям. При движении пара в виде отдельных струй через металлическую насадку (цепи, кольца, стружки, пластины) масляная взвесь трется о насадку, теряет свою подъемную силу, собирается на поверхности металла в более крупные капли, которые в виде тонких струй или пленок стекают вниз.

Наибольшее распространение получили маслоотделители с насадкой из цепей (рис. 8-12, а). Такой маслоотделитель представляет собой цилиндр 1 с двумя рядами колец 4 (вверху и внизу); между кольцами на расстоянии около 30 мм одна от другой натянуты стальные цепи, общее число которых достигает 2000—2500 (путь пара указан на чертеже стрелками). Масло с небольшим количеством конденсата отводится через нижний патрубок 11.

Объем цилиндрической части маслоотделителя определяют из расчета 3,7—4 т/ч пара на 1 м³ его объема. Высота рабочей части маслоотделителя h_p выбирается в зависимости от производительности в пределах 1—2 м; внутренний диаметр $d_{вн}$ определяют по эмпирической формуле:

$$d_{вн} = 100 \frac{G}{h_p}, \text{ мм}, \quad (8-18)$$

где G — расход очищенного пара, кг/ч.

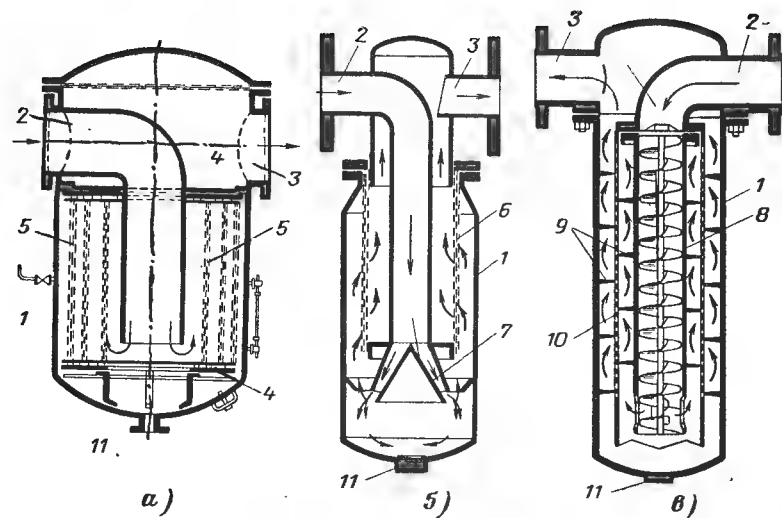


Рис. 8-12. Механические маслоотделители.

а — цепной; б — сетчатый; в — с винтовой вставкой; 1 — корпус; 2 — паровпускная труба; 3 — штуцер для выхода пара; 4 — кольца для цепей; 5 — цепи; 6 — сетчатые цилиндры; 7 — конус; 8 — винтовая вставка; 9 — горизонтальные перегородки; 10 — кожух с отверстиями; 11 — выход масла.

Общая высота аппарата H составляет около удвоенной высоты рабочей части маслоохладителя.

В маслоотделителе, показанном на рис. 8-12, б, пар ударяется о конус 7, где оседают частицы масла и конденсата, стекающие затем вниз. Далее пар проходит через сетку с мелкими ячейками, расположенную в несколько рядов в виде цилиндров. Между рядами образуется водяная завеса, в которой улавливаются оставшиеся взвешенными мельчайшие частицы масла.

В маслоотделителе, показанном на рис. 8-12, в, пар движется вниз по трубе 2, в которую вставлены винтовые пластинки 8, вследствие чего пар приобретает вращательное движение. При этом частицы масла отбрасываются к стенкам трубы и стекают вниз. При выходе из центральной трубы пар делает крутой поворот и поднимается вверх, многократно изменяя направление под действием горизонтальных перегородок 9 и кожуха с отверстиями 10.

После механической очистки в паре все же остается масло до 6—10 мг/кг пара. Если такая степень очистки не удовлетворяет, то после механической очистки пар промывают в водном растворе сульфата алюминия, едкого натра или гидрата окиси алюминия. В растворе эмульгированные частицы масла коагулируют и переходят в состояние, в котором могут быть отфильтрованы. В результате промывки содержание масла в паре снижается до 1—2,5 мг/кг.

8-10. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ОЧИСТКИ КОНДЕНСАТА

Конденсат, возвращаемый от технологических потребителей, может быть загрязнен маслом, механическими включениями и газами. Для очистки конденсата применяют различные специальные устройства.

Нерастворенные частицы масла в виде пленки на поверхности конденсата и взвешенных частиц в его объеме могут быть удалены в отстойниках и в механических фильтрах. В качестве фильтрующего материала применяют кварцевый песок, гравий, кокс, отработанный глауконит и другие зернистые и кусковые материалы. Наибольшее распространение получили двухступенчатые фильтры, в которых конденсат пропускают сначала через активированный уголь, а затем через кварцевый песок. В таких очистителях содержание масла можно снизить с 300 до 0,15—0,5 мг/л.

Нормальная удельная нагрузка $7,5 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$ для угольных и $5 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{м}^2$ для кварцевых фильтров. Высота фильтрующего слоя активированного угля 1,2—1,5 м, фракция зерен — 0,5—2 мм. Скорость движения конденсата в фильтрах сверху вниз должна составлять около 5 м/ч. Поглощительная способность угля — 175 г масла на 1 кг угля. Продолжительность работы угля равна по опытным данным примерно 3 мес.

От механических примесей конденсат очищают посредством дренажа конденсатных баков, а также в грязевиках по пути его транспортировки (см. рис. 8-8). От газов (главным образом от кислорода) конденсат очищают в деаэраторах (тепловая деаэрация) и в сталестружечных фильтрах (химическая деаэрация). Один из фильтров с насадкой из стальных стружек, расположенный в конденсатном баке, показан на рис. 8-13. Размеры фильтра выбирают из расчета срабатывания стру-

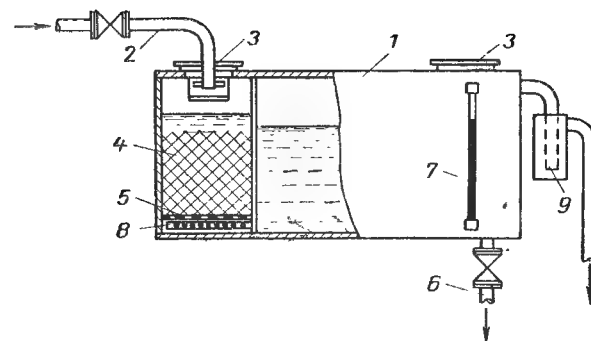
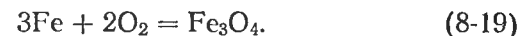


Рис. 8-13. Химический фильтр с насадкой из стальных стружек, расположенный в баке для сбора конденсата.

1 — конденсатный бак; 2 — подвод конденсата; 3 — лаз; 4 — стружки; 5 — дырчатый поддон; 6 — вывод конденсата; 7 — водомерное стекло; 8 — перфорированная труба для перетока конденсата; 9 — гидравлический затвор.

жек на 50% после годичной эксплуатации, полагая, что нормальная замена стружек производится не чаще 1 раза в год. Расчет расхода железа в фильтрах ведется на основе формулы



Согласно (8-19) на 1 кг поглощаемого кислорода требуется 2,6 кг железа, а с учетом износа стружек только на 50% следует принимать в расчете 5,2 кг стружек на 1 кг кислорода. Расчетная формула для определения объема стружек имеет вид:

$$V = \frac{Gnk}{192\gamma}, \text{ м}^3, \quad (8-20)$$

где G — среднечасовой расход конденсата, $\text{м}^3/\text{ч}$; n — число часов работы фильтра между сменами стружек; k — начальное среднее содержание кислорода в фильтруемой воде, $\text{г}/\text{м}^3$; γ — насыпной вес стружек, равный обычно $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$.

В зависимости от содержания кислорода в конденсате скорость фильтрования принимают в пределах 25—100 м/ч. Большие скорости соответствуют меньшему содержанию кислорода. Потери напора в сталестружечных фильтрах колеблются в пределах от 0,5 до 2 м вод. ст.

Общая протяженность трубопроводов на современном промышленном предприятии достигает десятков километров, а их вес — несколько сотен тонн. Системой трубопроводов связаны парогенераторы, турбины, все теплоиспользующие установки, насосы и все вспомогательное оборудование, и их нормальная эксплуатация возможна только при безаварийной работе трубопроводов.

Объем работ по изготовлению узлов и по монтажу паропроводов, газопроводов, нефтепроводов, продуктопроводов, теплофикационных и канализационных трубопроводов составляет около 50% стоимости общего объема монтажных работ. Объем работ по обвязочным трубопроводам достигает 65—70% объема монтажных работ при сооружении теплоиспользующей установки.

Современные методы строительства и монтажа оборудования базируются на промышленных способах прокладки трубопроводов: на массовом заводском изготовлении всех деталей трубопроводов, централизованном изготовлении пространственных трубных узлов, поточном изготовлении каркасов и элементов тепловой изоляции и т. д.

Независимо от их назначения и степени ответственности все трубопроводы для пара, горячей воды и технологического продукта должны соответствовать «Правилам устройства, установки, содержания и освидетельствования паропроводов и трубопроводов горячей воды», разработанным Госгортехнадзором и распространяющимся на пар давлением свыше 2 ат и на другие теплоносители с температурой выше 120°С. В отношении требований к качеству материала и сварки, а также к порядку регистрации, освидетельствования и обслуживания трубопроводов делаются на четыре категории в зависимости от давления и температуры теплоносителя (табл. 8-10). Правила не распространяются на трубопроводы I категории с $d_{\text{пар}} < 51$ мм и II, III и IV категорий с $d_{\text{пар}} < 76$ мм.

Главные трубопроводы цеха, участка или теплоиспользующей установки должны быть просты по схеме и надежны в эксплуатации, т. е. должны быть сведены к минимуму простои и связанная с ними недовыработка основного технологического продукта из-за аварийного

Классификация трубопроводов в зависимости от параметров среды

Категория трубопровода	Наименование среды	Рабочие параметры среды	
		Давление (изб.) кг/см ²	Температура, °С
I	Перегретый пар Перегретый пар Перегретый пар Насыщенный пар, горячая вода	Независимо Независимо Независимо Свыше 184	От 610 до 660 От 570 до 610 От 450 до 570 Свыше 120
II	Перегретый пар Насыщенный пар, горячая вода	До 39 От 80 до 184	От 350 до 450 Свыше 120
III	Перегретый пар Насыщенный пар, горячая вода	До 22 От 16 до 80	От 250 до 350 Свыше 120
IV	Перегретый и насыщенный пар, горячая вода	1—16	От 120 до 250

состояния трубопроводов. Требование надежности вызывает необходимость в установке достаточного количества запорной арматуры для отключения поврежденных участков, а также необходимости в резервных линиях основных магистралей. Арматура и фланцы являются самыми слабыми местами трубопроводов, а вместе с тем и дорогостоящими. Поэтому достаточная надежность трубопровода должна быть обеспечена при минимальном количестве арматуры и резервных линий. Замена фланцев сварными соединениями повышает надежность и содействует упрощению конструкции и удешевлению трубопроводов. Фланцевые соединения допускаются только в местах присоединения арматуры и на подходе к технологическим аппаратам. Типы и размеры фланцев при проектировании трубопроводов подбирают по ГОСТ.

Из 10 типов фланцев для соединения труб при $p_{\text{усл}}$ до 100 ат нашли наибольшее применение три (табл. 12-3): плоские приварные для $p_{\text{усл}} = 2,5 \div 25$ ат, приварные для $p_{\text{усл}} = 16, 25, 40, 64$ и 100 ат и свободные с буртом для $p_{\text{усл}} = 40, 64$ и 100 ат (рис. 12-15). При проектировании

сварных трубопроводов необходимо соблюдать правила Госгортехнадзора в части расчетных коэффициентов прочности сварных швов, видов швов, качества электродов, допустимых мест стыкования, квалификации сварщиков и др.

Все трубы подвергаются на заводах-изготовителях гидравлическому испытанию давлением: бесшовные — равным двойному рабочему (но не менее 50 ат), а сварные — превышающим условное давление не менее чем в 1,5 раза. В собранном виде все трубопроводы (кроме IV категории) подвергаются гидравлическому испытанию давлением, равны 1,25 рабочего давления.

Диаметры труб и арматуры, а также форма трубопровода должны быть наиболее рациональными с точки зрения потери давления. Если гидравлическое сопротивление готового трубопровода превышает расчетное, то его необходимо понизить уменьшением числа запорных органов, заменой вентилей на задвижки, сопротивление которых во много раз меньше, и в последнюю очередь — путем увеличения условного прохода некоторых участков трубопровода, не изменяя диаметров присоединений к аппаратам, котлам, компрессорам и турбинам.

Диаметр паропровода d определяют по формуле

$$d = \sqrt{\frac{G}{2828 \omega \gamma}}, \text{ м}, \tag{8-21}$$

где G — расход пара, кг/ч; γ — удельный вес пара, кг/м³; ω — скорость пара, м/сек.

Скорость пара в паропроводах принимают: в магистральных перегретого пара 40—80 м/сек; в ответвлениях от магистрали перегретого пара и в магистралях насыщенного пара — 35—60 м/сек; в паропроводах отборного и вторичного пара — 30—50 м/сек. При малых диаметрах для уменьшения сопротивления паропроводов следует принимать меньшие скорости.

Трубопроводы должны быть надежно укреплены и вместе с тем иметь возможность удлиняться при нагревании без нарушения целости труб и сварных швов и плотности фланцевых соединений. Опоры и подвески трубопроводов, подвергающихся гидравлическим испытаниям, должны быть рассчитаны на вес трубопровода, заполненного водой и покрытого тепловой изоляцией, а также на силы, возникающие при термической деформации.

Т а б л и ц а 8-11

Окраска и надписи на трубопроводах различного назначения

Назначение трубопроводов	Вид среды	Условное обозначение	Основной цвет	Цвет колец	Цвет полос
Паропроводы	Перегретый пар острый в. д.	ПП/в. д.	Красный	Черный	Без полос
	Перегретый пар острый с. д.	ПП/с. д.	»	Без колец	» »
	Насыщенный пар острый	ПН	»	Голубой	» »
	Пар промежуточного подогрева с. д.	ППр/с. д.	»	Желтый	» »
	Пар отборный и противодавления	ПО	»	Зеленый	» »
Водопроводы	Питательная вода	ВП	Зеленый	Без колец	Без полос
	Химически очищенная вода	ВХ	»	» »	» »
	Конденсат	ВХ	»	Белый	» »
	Продувка и дренаж	ВД	»	Синий	» »
	Теплофикационная линия:				
	прямая	ПС	»	Желтый	» »
	обратная	ОС	»	Коричневый	» »
	Пожарный водопровод	В пож.	Оранжевый	Без колец	» »
	Техническая вода	ВТ	Черный	» »	» »

Продолжение табл. 8-11

Назначение трубопроводов	Вид среды	Условное обозначение	Основной цвет	Цвет колец	Цвет полос
Масло и нефтепроводы	Мазут, нефть, керосин Масло	Н М	Черный Коричневый	Без колец Желтый	Без полос » »
Воздухопроводы и короба	Сжатый воздух	ВЗС	Голубой	Без колец	Черный
	Горячий дутьевой воздух	ВЗГ	Черный	» »	Желтый
	Холодный дутьевой воздух	ВЗХ	»	» »	Голубой
Газопроводы и короба (внутри здания)	Дымовые газы	ГТ	Темно-серый	Без колец	Без полос
	Доменный газ	ГД	Желтый	» »	» »
	Коксовый газ	ГК	»	Черный	» »
	Генераторный газ	ГГ	»	Без колец	» »
	Нефтяной газ	ГН	»	» »	» »
	Кислород	ГК	Синий	» »	» »
	Ацетилен	АЦ	Белый	» »	» »
Пылепроводы	Аэропыль	АП	Алюминиевый или светлосерый	» »	» »

ции трубопровода. На трубопроводах с горячим теплоносителем устанавливают компенсаторы температурных удлинений с разделением компенсируемых участков неподвижными опорами.

Горячие трубопроводы покрывают тепловой изоляцией с таким расчетом, чтобы наружная температура изоляции не превышала 50° С при температуре окружающего воздуха 25° С. Тепловая изоляция фланцевых соединений должна быть съёмной.

В нижних точках каждого участка труб, отделяемого задвижками, должен быть предусмотрен дренажный штуцер с вентилем для опорожнения трубопровода. В верхних точках трубопровода должны быть установлены воздушники. Согласно «Правилам» Госгортехнадзора уклон паропровода в сторону движения пара должен быть не менее 1 мм на 1 м длины.

Трубопроводы различного назначения должны быть соответственно окрашены и снабжены надписями, условно обозначающими характер среды (табл. 8-11).

Трубопроводы должны быть легко доступны для осмотра и ремонта и оборудованы соответствующими площадками. Расположение арматуры должно быть удобным для обслуживания. При затруднительности непосредственного управления запорными органами с площадок обслуживания, а также если оно может быть связано с опасностью для персонала, должно быть предусмотрено дистанционное управление. На трубопроводах диаметром 350 мм и более задвижки и вентили рекомендуется устанавливать с механическими или электрическими приводами.

8-12. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Большая химическая активность многих технологических материалов, высокая концентрация агрессивных солевых растворов, возможность образования взрывоопасных смесей газов с воздухом в химической и других отраслях промышленности обязывают уделять внимание способам защиты приборов контроля и автоматики от коррозии и разрушения. Особое внимание уделяется способам защиты от коррозии датчиков и вторичных приборов.

Технический уровень средств контроля и автоматизации химических предприятий определяется общим механическим уровнем приборостроения.

Для измерения температуры следует применять термопары и термометры сопротивления в корпусах категории «водозащищенный» и пылевлагонепроницаемый», например, типов ТСП-922, ТСП-288М, ТСП-281 и др. [Л. 54]. Защитные гильзы для них должны быть изготовлены из легированных сталей, никеля, титана, тантала и др. Если допустимо повышение инерционности термодатчика, то можно применять защитные гильзы с покрытиями из эмали, винипласта, фторопласта и других пластмасс.

Во многих производствах, в том числе в хлорном, в СССР нашел применение новый платиновый термометр сопротивления типа ТСП-982, предназначенный для измерения температуры различных химических сред в пределах от -50 до $+140^{\circ}\text{C}$. Этот термометр выполнен во взрывозащитном исполнении категории ВЗГ. Защитная арматура рассчитана на условное давление $p_{\text{усл}} = 6 \text{ кгс/см}^2$. В качестве вторичных приборов при измерении и регулировании температуры на заводах СССР получили распространение электронные автоматические мосты и потенциометры с дисковой или прямоугольной диаграммами типов ЭМД, ЭМП, ЭПД и ЭПП. Для автоматического регулирования температуры в пожаро- и взрывоопасных помещениях практический интерес представляют dilatометрические пневматические терморегулирующие устройства типа ТУДП. Их техническая характеристика приведена в [Л. 54].

Приборы для измерения давления и вакуума. В СССР специальные манометры для измерения и регулирования давления химически агрессивных сред пока не выпускаются. Широко используются манометры общепромышленного назначения типов МПД, МСП, МЭД и др. с надежной защитой от коррозии. Для защиты манометров от коррозии применяют разделительные устройства: мембранные РУ-М, компенсационные разделители типов РКД и РКВ, разделительные жидкости (например, трансформаторное масло), защитную поддувку инертного газа и сочетание двух последних способов (подробнее см. [Л. 54]).

Для измерения и регулирования вакуума в условиях химических предприятий можно рекомендовать компен-

сационный вакуумметр типа ИВП-04-1, пригодный для измерения остаточного давления до 50 мм рт. ст.

Расход газов и жидкостей на химических предприятиях измеряют главным образом методом переменного перепада давления на сужающих (дрессельных) устройствах типа диафрагмы, сопла и т. п. Широкое распространение получили компенсационные дифманометры типов ДМПК-4 и ДМПК-100, ДСПК и мембранные типов ДМ-4, ДМ-6 и ДМ-8. При измерении расхода легко кристаллизующихся агрессивных жидкостей (рассолов, электролитических щелоков и др.) применяют укороченные стальные трубы Вентури, гуммированные или покрытые пластической массой внутри. Для защиты приборов от коррозии в химической промышленности также применяют разделительные жидкости, защитную поддувку газа и компенсационные разделители типа РКП.

Расход легко кристаллизующихся растворов измеряют также стеклянными ротаметрами типов РСФ и РПФ (техническую характеристику см. в [Л. 42]). Для измерения расхода агрессивных и легко кристаллизующихся электропроводящих жидкостей перспективны индукционные расходомеры типов 3-РИ-М, 4-РИ-1 и др. Для измерения расхода кислот, щелочей и других агрессивных веществ за рубежом начали применять объемные и скоростные счетчики фирмы «Мангель» (ФРГ).

Измерение уровня в аппаратах и емкостях с агрессивными жидкостями производят стеклянными (трубки, стекла клингер), поплавковыми, буйковыми и пьезометрическими указателями уровня. При контроле уровня поплавковыми и буйковыми приборами возникают затруднения вследствие обрастания поплавков и буйков кристаллами солей. Как и в описанных выше случаях, для защиты от коррозии измерителей уровня в последние годы разработаны методы, использующие компенсационные устройства типов РКД и РКВ. Для измерения уровня агрессивных жидкостей широкое распространение получил емкостный метод, в основу которого положено изменение полной емкости электрической цепи, состоящей из электрода (щупа), опущенного вертикально в измеряемую жидкость, и стенок аппарата [Л. 54]. В химической промышленности нашли применение электрические емкостные измерители уровня типов ЭИУ-1 и ЭИУ-2

В химической промышленности получили распространение сигнализаторы уровня (УАС-1, УРС-1 др.), в основу конструкции которых положен принцип действия выталкивающей силы на полый буюк. Усилие, возникающее при изменении уровня, передается через разделительную мембрану на сильфон и преобразуется в давление, действующее на трубчатую пружину обычного контактного манометра. Система заполняется маслом; все детали изготовлены из титана и фторопласта-4.

Для анализа состава и свойств различных жидкостей применяют плотномеры, кондуктомеры, оптические и ультразвуковые концентратомеры, анализаторы состава многокомпонентных смесей, автоматические титраторы и другие приборы. Принцип действия и области их применения описаны в специальной литературе [Л. 22, 54, 67, 68 и др.].

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Произведите экономическое сравнение смесительных конденсаторов низкого уровня и барометрического.
2. Нарисуйте схему и объясните принципы работы монтажу.
3. Объясните принцип и необходимое условие работы эрлифта.
4. Перечислите группы конденсатоотводчиков и принцип их работы.
5. Что такое максимальная и фактическая производительность и как их используют при подборе конденсатоотводчиков?
6. Нарисуйте принципиальные схемы работы брызгоотделителей.
7. Как выражается производительность отстойника и от каких факторов она зависит?
8. Каков принцип работы фильтров?
9. Что называют фактором разделения для центрифуг? Чем достигается его увеличение?
10. Как выбрать емкость конденсатного бака? То же промежуточной емкости для выпарной станции?
11. Где целесообразна установка расширительных бачков и каков принцип их подбора?
12. Нарисуйте принципиальные схемы набивкоуловителей и маслоотделителя для пара.
13. Какие очистители конденсата Вы знаете? Опишите их конструкцию.
14. Назовите основные правила монтажа главных трубопроводов для теплоиспользующих установок.
15. В чем заключается особенность измерения температуры, давления и расхода в технологических установках? Какие приборы для этого применяют?

Раздел второй

Изготовление, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок

Глава девятая

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ВЫБОР

9-1. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛАМ

Выбор конструкционных материалов для теплообменных аппаратов является одной из важнейших задач при их проектировании. Кроме удовлетворения требованиям по механическим свойствам, конструкционные материалы должны удовлетворять также некоторым специфическим требованиям, например отличаться теплоустойчивостью, коррозионной стойкостью, а также быть дешевыми и недефицитными. Все конструкционные материалы отличаются одновременно рядом положительных свойств и недостатков. Нет материалов, которые обладали бы всеми необходимыми положительными свойствами. Термически стойкий материал может оказаться недостаточно стойким химически. Прочный материал может быть очень хрупким или обладать плохой обрабатываемостью. Материал с высокими механическими и антикоррозионными свойствами может оказаться очень дорогим или дефицитным.

Выбор материала начинается с уточнения рабочих условий в аппарате: температуры, давления, химических свойств и концентрации теплоносителей, колебаний нагрузки и др. Поэтому следует выбирать такие материалы, которые хорошо отвечали бы главным требованиям, определяемым назначением и условиями работы оборудования.

В качестве конструкционных материалов для теплообменных аппаратов используются преимущественно малоуглеродистые нелегированные стали и чугуны как

Таблица 9-1

Шкала коррозионной стойкости металлов (ГОСТ 5272-50)

Группа стойкости	Балл коррозионной стойкости	Скорость коррозии, мм/год
Совершенно стойкие	1	Менее 0,001
Весьма стойкие	2	0,001—0,005
	3	0,005—0,01
Стойкие	4	0,01—0,05
	5	0,05—0,1
Пониженно стойкие	6	0,1—0,5
	7	0,5—1
Малостойкие	8	1—5
	9	5—10
Нестойкие	10	Более 10

наиболее технологичные, дешевые и недефицитные материалы, отличающиеся вполне удовлетворительными механическими свойствами; уровень этих свойств вполне достаточен для широкого круга деталей и узлов теплообменных аппаратов.

Большим достоинством чугунов являются их высокие литейные свойства, что позволяет изготавливать из них детали сколь угодно сложной формы, и повышенная износостойкость многих из них; высокопрочные и ковкие чугуны отличаются, кроме того, также и пластичностью.

Малоуглеродистые нелегированные стали характеризуются высокой пластичностью как на холоду, так и в нагретом состоянии, и поэтому хорошо поддаются обработке давлением в холодном и в горячем состоянии, а также очень хорошей свариваемостью. При этом они достаточно прочны при температурах до 450°С, хорошо воспринимают динамические нагрузки и достаточно устойчивы против коррозии в неагрессивных средах.

Детали и узлы теплоиспользующих аппаратов химической промышленности, работающих в контакте с агрессивными средами, изготавливают из особо коррозионно-стойких материалов — высоколегированных сталей, вплоть до аустенитных хромоникелевых, в том числе и с присадками кремния и молибдена, повышающими их коррозионную стойкость, а также из высоколегированных чугунов с присадками кремния, хрома, никеля и меди.

Пригодность металлических материалов по химической стойкости оценивается по шкале ГОСТ 5272-50, приведенной в табл. 9-1. Для изготовления теплообменных аппаратов применяют обычно материалы, скорость коррозии которых не превышает 0,1—0,5 мм в год.

Поскольку подавляющее большинство теплоиспользующих аппаратов работает при температурах не выше 350°С, при которых не получают развития явления ползучести стали — основного конструкционного материала, постольку в настоящей книге не рассматриваются стали и сплавы, устойчивые против ползучести. При необходимости исчерпывающие данные о них можно найти в обширной специальной литературе.

9-2. ЧУГУНЫ

Содержание углерода в серых чугунах колеблется в пределах от 2,8 до 3,7%, содержание других компонентов составляет: кремния — 1,5—2,5%, марганца — 0,1—1%, фосфора — до 0,8% и серы — до 0,12%.

Согласно ГОСТ 1412-54 серые чугуны маркируются по прочности металла в отливке. В маркировке чугунов буквы СЧ означают «серый чугун», два двузначных числа, разделенных дефисом, означают: первое — минимальный предел прочности чугуна на растяжение, второе — минимальный предел прочности на изгиб, кгс/мм².

Области применения марок серого чугуна приведены в табл. 9-2. Следует иметь в виду, что по нормам Госгортехнадзора при проектировании чугунных изделий допускается применение серого чугуна для аппаратов, температура стенок которых не превышает 250°С, а также что:

1) из чугуна марок не ниже СЧ15-32 допускается изготовление сосудов диаметром до 1 м при внутреннем давлении не выше 6 ат и диаметром до 2 м при внутреннем давлении не выше 3 ат;

Таблица 9-2

Механические свойства и области применения серых чугунов

Марка чугуна	Предел прочности, кг/мм ² , не менее			Характеристика изделий
	при растяжении	при изгибе	при сжатии	
СЧ00 ¹	Не испытывается			Изделия простой конфигурации, не требующие большой прочности: крышки, подкладки, пробки, грузы, ректификационные колпачки
СЧ12-28	12	28	50	Обечайки для аппаратов без давления, опоры аппаратов, рамы машин, гарнитура печей, тарелки ректификационных колонн
СЧ15-32 СЧ18-36	15 18	32 36	55 70	Трубы для оросительных теплообменников и детали к ним, корпуса конденсаторов, арматура и фитинги низкого давления
СЧ21-40 СЧ24-44	21 24	40 44	75 85	Ответственные детали со знакопеременными нагрузками, корпуса задвижек и клапанов для средних давлений, цилиндры насосов и компрессоров, колеса центробежных насосов
СЧ28-48 СЧ32-52	28 32	48 52	100 110	Корпуса и цилиндры компрессоров и паровых насосов, червячные колеса, шестерни, маховики
СЧ35-56 СЧ38-60	35 38	56 60	120 130	Особо ответственные детали насосов, компрессоров и теплообменных аппаратов, работающих с повышенным давлением

¹ Механические свойства не гарантируются; чугун на прочность не испытывается.

2) из чугуна марок СЧ18-36 или выше — диаметром до 3 м для внутреннего давления не выше 3 ат;

3) при наружном давлении до 8 ат допускается максимальный диаметр сосуда не более 2 м.

Недостатком серого чугуна является так называемый рост, т. е. необратимое увеличение объема в условиях работы при высоких температурах, особенно в условиях теплосмен.

Ограничения роста серого чугуна достигают присадкой 1—2% Ni. Хорошо сопротивляется росту чугун с содержанием 14% Ni, 6% Cu и 4% Cr.

Повышения прочности серого чугуна достигают модифицированием его добавками силикокальция, силикоалюминия или ферросилида. Благодаря однородности строения и мелкозернистости модифицированные чугуны марок СМЧ28-48, СМЧ32-52, СМЧ35-56 и СМЧ38-60 отличаются повышенной износостойкостью и прочностью при динамических нагрузках, хорошей обрабатываемостью на станках и повышенной химической стойкостью.

Присадка к чугуну в ковш перед разливкой 0,4—0,6% магния создает условия для получения в структуре чугуна шаровидных включений графита, что способствует повышению пластичности и ударной вязкости серого чугуна. Получаемые таким путем так называемые высокопрочные чугуны (ГОСТ 7293-54) соединяют в себе высокие механические свойства стали и литейные свойства серого чугуна; они вытесняют ковкий чугун, способный без разрушения испытывать значительные деформации. В аппаратостроении ковкий чугун применяют для изготовления небольших и тонкостенных деталей, арматуры и фитингов. Марки ковкого чугуна обозначаются буквами КЧ и двузначным числом, показывающим минимальное значение относительного удлинения в процентах, например КЧ37-12, КЧ33-8, КЧ60-3 и т. д. Аналогично, но с буквами ВЧ обозначаются марки высокопрочного чугуна, например ВЧ40-10.

В аппаратостроении, особенно в производстве химической аппаратуры, нашли широкое применение легированные чугуны, химическая стойкость и окислительная стойкость которых повышены добавками хрома, кремния, молибдена, никеля, алюминия и других элементов. Для установок с растворами серной и соляной кислот широко применяют кремнистые чугуны — ферросилид и анти-

хлор по ГОСТ 2233-43. Хромоникелемедиистые чугуны применяют для труб, по которым перекачивают хлористый водород, сероводород, серную кислоту и каустическую соду. Высокохромистые чугуны Х23, Х28 и Х34, в марках которых двузначным числом обозначено процентное содержание хрома, отличаются высокой химической стойкостью и окалиностойкостью до 1000°С.

9-3. СТАЛИ

Стали являются самым распространенным конструкционным материалом в аппаратостроении. Механические, физические и химические свойства стали могут быть изменены в широких пределах присадкой различных легирующих элементов, а также термической и химико-термической обработкой.

Углеродистые стали

В зависимости от степени чистоты (содержания вредных примесей), способа выплавки и раскисления, степени однородности свойств и комплекса приемочных испытаний углеродистые конструкционные стали делятся на стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-60*) и стали качественные (ГОСТ 1050-60*). Оба отмеченных стандарта называются базовыми, т. е. в них регламентированы марки сталей, их обозначения и общие технические требования — без указания узкого назначения стали той или иной марки. В стандартах и технических условиях на конкретные изделия из конструкционных углеродистых сталей ссылаются на стали базовых стандартов или на их типы.

Марки сталей обыкновенного качества обозначаются буквами «Ст.» и условными номерами от 1 до 7, например Ст. 3, причем с увеличением номера возрастает содержание углерода в стали и тем самым повышается ее прочность. Стали марок Ст. 1—Ст. 4 относятся к малоуглеродистым, стали марок Ст. 5—Ст. 7 — к среднеуглеродистым сталям. Малоуглеродистые стали с некоторыми регламентированными стандартом отклонениями от нормы группируются в сталь марки Ст. 0, из которой допускается изготовление неответственных изделий (перил, настилов и т. п.).

Стали обыкновенного качества делятся на группы А и Б и подгруппу В. Стали группы А поставляются по механическим свойствам, стали группы Б — по химическому составу, стали подгруппы В — по механическим свойствам и по химическому составу. В обозначениях марок группы Б перед буквами «Ст.» ставится буква, отражающая способ выплавки стали (М — мартеновская, К — конвертерная, Б — бессемеровская), например МСт. 5, КСт. 3. В обозначении марок стали подгруппы В перед буквами «Ст.» ставится буква В, а способ выплавки не указывается, так как стали подгруппы В выплавляются только мартеновским способом.

В последние годы в СССР получила широкое развитие выплавка углеродистых сталей в кислородных конвертерах с основной футеровкой, с продувкой кислородом сверху. Многочисленные исследования и эксплуатационное опробование в очень широком масштабе показали, что конвертерные стали не уступают практически по качеству и свойствам мартеновским сталям.

Степень раскисленности стали, т. е. степень удаления из нее избыточного кислорода, отмечается буквами в конце обозначения марки. Марки спокойной (полностью раскисленной) стали обозначаются буквами «сп», марки не полностью раскисленной (кипящей) стали — буквами «кп», марки стали промежуточной степени раскисленности (полуспокойной) — буквами «пс». Отсутствие букв в конце обозначения марки указывает на то, что сталь относится к спокойной, буквы «кп» и «пс» ставятся обязательно.

Кипящими выплавляются только малоуглеродистые стали марок Ст. 1—Ст. 4, полуспокойными — малоуглеродистые и среднеуглеродистые (до Ст. 6).

К наименее качественным (более хладноломким и более склонным к старению) относятся кипящие стали, наиболее высоким качеством отличаются спокойные стали. Сильно обжатый прокат (листы толщиной до 10—12 мм, фасонные профили со стенками толщиной до 10 мм) из полуспокойных сталей равноценен по качеству и свойствам спокойным сталям.

Качественные конструкционные углеродистые стали по ГОСТ 1050-60* поставляются по механическим свойствам и по химическому составу, причем комплекс приемочных механических испытаний этих сталей сложнее, чем сталей группы А и подгруппы В по ГОСТ 380-60*.

Марки качественных сталей обозначаются двузначным числом, выражающим среднее содержание углерода в стали данной марки в сотых долях процента (например, 08, 20, 45). Степень раскисленности качественных сталей обозначается также буквами «кп» или «пс», помещаемыми в конце обозначения марки.

В зависимости от степени ответственности деталей и условий их работы в аппаратостроении используются углеродистые стали обеих качественных категорий, причем для свариваемых элементов и деталей, а также для деталей с высокой пластичностью применяются преимущественно стали типов Ст.3 и 20, реже типов Ст.2, Ст. 4, 10 и 15, а также листовые котельные стали марок 15К и 20К по ГОСТ 5520-62.

Для деталей повышенной прочности (крепежных и др.), изготавливаемых обычно без применения сварки, применяют чаще всего стали Ст. 5, 25, 30, 40 и 45.

Углеродистые стали для стального фасонного литья (ГОСТ 977-53) обозначаются аналогично качественным конструкционным углеродистым сталям с добавлением буквы Л в конце обозначения марки. Это — только спокойные стали.

Легированные стали¹

Низколегированные стали. В последние годы в производстве теплового оборудования начали широко применять низколегированные стали повышенной прочности для изготовления элементов, работающих при температурах не выше 450°С, т. е. в условиях отсутствия ползучести. Эти стали применяются взамен малоуглеродистых нелегированных сталей с целью облегчения веса элементов и снижения металлоемкости установок. По коррозионной стойкости и технологичности эти стали не уступают углеродистым, они достаточно пластичны и хорошо свариваются, однако сварные соединения этих сталей требуют обязательного проведения термической обработки — высокого отпуска. Сварка этих сталей дол-

жна производиться с предварительным или сопутствующим подогревом.

Наиболее широкое распространение получили низколегированные стали повышенной прочности марок 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС и 15ГС, легированные наиболее дешевыми легирующими элементами — кремнием и марганцем. Минимальный предел текучести этих сталей составляет 30—35 кгс/мм², т. е. он значительно превышает предел текучести нелегированных малоуглеродистых сталей (21—24 кгс/мм²). Это позволяет значительно снизить вес элементов и конструкций.

Свойства низколегированных теплоустойчивых сталей с присадками молибдена, хрома, ванадия, ниобия и других элементов, работающих в условиях ползучести, т. е. при температурах выше 450°С, подробно описаны в справочной и научно-технической литературе и поэтому здесь не рассматриваются (стали марок 16М, 12МХ, 15ХМ, 12Х1МФ, 15Х1М1Ф, 12Х2МФСР, 12Х2МФБ).

Высоколегированные стали. Несмотря на высокую относительную стоимость, высоколегированные стали с каждым годом находят все большее применение в энергетической и химической промышленности благодаря своим высоким качествам: прочности, жаропрочности и коррозионной стойкости.

В аппаратостроении широкое распространение нашли высоколегированные аустенитные стали следующих марок (ГОСТ 5632-61): X18H9T, OX18H12Б, X18H12T, X17H13M2T, X17H13M3T, X20H14C2, X23H18, X23H13 и X25H20C2. Наибольшее распространение получила сталь X18H9T, отличающаяся большой стойкостью против разъедающего действия азотной кислоты, нитритов, нитратов, уксусной и фосфорной кислот, щелочей и других агентов и более низкой стоимостью по сравнению с другими высоколегированными аустенитными сталями.

Аустенитная сталь X17H13M3T применяется для изготовления особо коррозионностойких элементов аппаратов.

Кроме высокой коррозионной стойкости, аустенитные хромоникелевые стали отличаются высокой жаропрочностью и поэтому широко применяются для изготовления элементов теплового оборудования, работающих в условиях ползучести при температурах выше 580°С. К наиболее жаропрочным из них относятся стали с содержанием никеля, превышающим содержание хрома, и

¹ В обозначениях марок легированных сталей каждому легирующему элементу присвоена прописная буква: Х — хром, Н — никель, М — молибден, В — вольфрам, Ф — ванадий, Т — титан, Б — ниобий, Г — марганец, С — кремний, К — кобальт, Д — медь, Ю — алюминий, Ц — цирконий, Р — бор; А — азот, Е — селен или теллур.

добавками вольфрама, ниобия и бора, например сталь 1X14H18B2BP (ЭИ695Р). Данные о свойствах жаропрочности этих сталей приведены в специальной литературе. Аустенитные стали хорошо поддаются горячей обработке давлением и хорошо свариваются; они чувствительны к наклепу и обрабатываются резанием хуже сталей других структурных классов.

К высоколегированным сталям, используемым при изготовлении теплоиспользующего оборудования, относятся также высокохромистые стали ферритного класса с низким содержанием углерода. Эти стали коррозионно- и окислительноустойчивы. К ним относятся стали марок ОХ13, Х14, Х17, Х17Т, Х25Т и Х28. Сталь Х17Т используется, например, в производстве оборудования азотнокислотных заводов (абсорбционные башни, теплообменники для горячих нитрозных газов и горячей азотной кислоты, баки для кислот, трубопроводы). Она рекомендуется также в качестве заменителя стали Х18Н10Т при изготовлении сварных конструкций, не подвергающихся действию ударных нагрузок, и при температурах эксплуатации не ниже минус 20°С. Ферритные стали свариваются хуже сталей других структурных классов.

Следует отметить также относительно недорогие стали мартенситного класса с суммарным содержанием легирующих элементов порядка 6—8%, которые принято относить к среднелегированным сталям, например хромомолибденовую сталь Х5М и хромокремнемолибденовую сталь Х6СМ. Они используются в нефтеперерабатывающей промышленности, так как способны работать при температурах 550—650°С без интенсивного окисления.

Подробные данные о свойствах и областях применения высоколегированных сталей приведены в приложениях к ГОСТ 5632-61 на стали и сплавы высоколегированные коррозионностойкие, жаростойкие и жаропрочные (деформируемые).

Ниже приводятся примерные сравнительные данные о стоимости сталей различных марок (стоимость углеродистой стали марки 20 принята за единицу):

Стали марки	20	Х6СМ	Х18Н9	Х18Н9Т	25Н20С2
Сравнительная стоимость	1	3,5	11	13	22

9-4. ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Цветные металлы и их сплавы отличаются, как правило, более высокими коррозионной стойкостью и теплопроводностью, чем стали и чугуны; поэтому, несмотря на повышенную стоимость, алюминий, медь, свинец, никель и сплавы с их участием, а в последние годы титан и тантал находят широкое применение в качестве конструктивных материалов для теплообменных аппаратов энергетической, химической, нефтяной, пищевой и других отраслей промышленности [Л. 6, 7, 41].

Предельные температуры поверхностей теплообмена, выполненных из цветных металлов (°С):

Алюминий	200	Титан	600
Свинец	140	Тантал	1 200
Медь и ее сплавы	250	Поверхности с мягкими припоями	120
Никель	500		

Алюминий. Физические свойства алюминия: удельный вес $\gamma=2,7 \text{ кг/дм}^3$, температура плавления $t_{пл}=657^\circ\text{С}$, теплоемкость $c=0,218 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda=188 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha=2,4 \cdot 10^{-5}$. Технически чистый алюминий выпускается по ГОСТ 11070-64 семи марок в зависимости от степени чистоты. Алюминий хорошо противостоит агрессивному воздействию азотной, фосфорной и уксусной кислот, хлора, хлористого водорода и соединений и паров серы, чему способствует образующаяся на поверхности металла плотная защитная пленка. Вместе с тем эта пленка затрудняет пайку и сварку металла. Для изготовления теплообменной и химической аппаратуры применяют алюминий марок АОО и АО, предварительно отожженный при 400°С, с пределом прочности на растяжение не менее 750 кгс/см² и относительным удлинением не менее 25%.

Медь. Физические свойства меди следующие: удельный вес $\gamma=8,9 \text{ кг/дм}^3$, температура плавления $t_{пл}=1083^\circ\text{С}$, теплоемкость $c=0,093 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda=340 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha=1,65 \cdot 10^{-5}$. Технически чистая медь выпускается по ГОСТ 859-66 пяти марок, две из которых — М2 и М3 с содержанием меди соответственно 99,7 и 99,5% применяют для конструирования теплообменной аппаратуры. Медь не образует защитных оксидных пленок, и поэтому она неустойчива химически в кислотах и в солях. Ее разрушают пары серного ангидрида и серы, сероводород, углекислота и аммиак. Однако медь химически устойчива в растворах щелочей. Высокая пластичность меди позволяет подвергать ее протягиванию, штамповке, вальцеванию и бортовке как в горячем, так и в холодном состоянии.

С понижением температуры прочность меди повышается и увеличивается ее теплопроводность: при -253°С она достигает 1 600 ккал/м² · ч · град. Эти особенности делают медь незаменимым материалом для аппаратов в криогенной технике.

Свинец. Высокая коррозионная стойкость свинца в серной кислоте и в ее солях обеспечили ему широкое применение в аппаростроении для сернокислотных заводов и в электропромышленности

для производства аккумуляторов. Удельный вес свинца $\gamma = 11,35 \text{ кг/дм}^3$, температура плавления $t_{пл} = 327^\circ \text{С}$, теплоемкость $c = 0,031 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda = 30 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha = 2,9 \cdot 10^{-5}$. По ГОСТ 3778-56 выпускают шесть марок свинца в зависимости от степени чистоты: СВ, СО, С1, С2, С3 и С4. Низкая температура плавления и исключительная мягкость свинца ограничивают область его применения. Из свинца изготавливают листы, трубы и прокладки для коррозионностойкой аппаратуры.

Никель. Физические свойства никеля: удельный вес $\gamma = 8,9 \text{ кг/дм}^3$, температура плавления $t_{пл} = 1452^\circ \text{С}$, теплоемкость $c = 0,10 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda = 58 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha = 1,34 \cdot 10^{-5}$. По ГОСТ 849-56 никель выпускают пяти марок; самый чистый из них НО содержит не менее 99,99% никеля. Никель прочен, тепло- и коррозионноустойчив, легко отливается и поддается горячей и холодной обработке давлением, благодаря чему представляет собой хороший материал для ответственных деталей теплообменных аппаратов. Однако из-за высокой стоимости область его применения ограничена главным образом коррозионностойкими покрытиями (никелированием, плакированием, обкладкой аппаратов) и присадками к легированным сталям.

Титан. Отличается относительно малым удельным весом $\gamma = 4,5 \text{ кг/дм}^3$ и высокой температурой плавления $t_{пл} = 1725^\circ \text{С}$. Теплоемкость титана $c = 0,13 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda = 13 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha = 8,44 \cdot 10^{-6}$. Титан отличается высокой прочностью и коррозионной стойкостью. Его не разрушают кипящая азотная кислота и царская водка, нитриты, нитраты и хлориды, однако 40%-ная серная кислота разъедает титан. По стоимости в изделии титан в 8—10 раз дороже аустенитной хромоникелевой стали, но легко окупается благодаря долговечности изделий. Титан поставляется в виде тонких (0,5—3 мм) листов и труб, проката, проволоки и литья. Титан сваривают под вакуумом в среде аргона.

Тантал. Прочный и тугоплавкий металл. Температура плавления тантала $t_{пл} = 3000^\circ \text{С}$, удельный вес $\gamma = 16,6 \text{ кг/дм}^3$, теплоемкость $c = 0,036 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda = 47 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, линейный коэффициент температурного расширения $\alpha = 6,57 \cdot 10^{-6}$. Тантал коррозионноустойчив в большинстве агрессивных сред. Он отличается высокой пластичностью, хорошо куется и штампуется. Сварка тантала затруднительна из-за его тугоплавкости. Тантал примерно в 100 раз дороже аустенитной хромоникелевой стали. Его применяют в виде тонкой фольги и только в тех случаях, когда вследствие агрессивности среды не могут быть применены другие материалы.

Цирконий. В последние годы в аппаратостроении начали применять цирконий. Его удельный вес $\gamma = 6,5 \text{ кг/дм}^3$, температура плавления $t_{пл} = 1850^\circ \text{С}$, теплоемкость $c = 0,068 \text{ ккал/кг} \cdot \text{град}$, теплопроводность $\lambda = 18 \text{ ккал/кг} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, температурный коэффициент линейного расширения $\alpha = 6,15 \cdot 10^{-6}$, предел прочности при растяжении $\sigma_b = 50\text{—}70 \text{ кгс/мм}^2$. Из циркония изготавливают фольгу, тонкие листы, трубы и прокат. Благодаря высокой химической стойкости, превышающей таковую титана и тантала, цирконий иногда используют для обкладки внутренних стен химических аппаратов. Цирконий получил распространение в ядерной технике.

9-5. СПЛАВЫ НА МЕДНОЙ ОСНОВЕ

Эти сплавы делятся на две группы: 1) сплавы меди с цинком, называемые томпаками (до 20% цинка) и латунями (от 20 до 50% цинка); 2) сплавы меди с оловом, кремнием, марганцем, алюминием, свинцом и другими добавками, называемые бронзами [Л. 6].

Латуни. Обозначение марок латуни начинается с буквы Л. Далее следуют буквы, соответствующие легирующим элементам, кроме цинка. Первое (двузначное) число показывает содержание меди в процентах; следующие цифры — содержание легирующих элементов в той последовательности, в какой расположены буквы. Например, ЛН 65-5 — латунь с содержанием 65% меди, 5% никеля; остальные цинк (30%).

По коррозионной стойкости латуни превосходят медь. Для предотвращения коррозионного растрескивания латуни отжигают. Латуни пластичны и хорошо обрабатываются резанием. В аппаратах, работающих под давлением, применяют отожженную латунь марок Л62, Л68 и ЛО70-1 по ГОСТ 1019-47. Из латуней Л62 и Л68 изготавливают трубы для поверхностей теплообмена общего назначения, в том числе для конденсаторов, работающих на пресной воде. Латунь ЛО70-1 применяется для труб, омываемых морской водой и другими содосодержащими жидкостями. Механические свойства латуни улучшаются при низких температурах, поэтому ее, как и медь, применяют для изготовления аппаратуры, используемой в криогенной технике.

Бронзы. Обозначения марок бронз начинаются буквами Бр, затем следуют буквы легирующих элементов. Цифры обозначают содержание этих элементов в процентах. Например, БрОЦ8-4 означает оловянистоцинковистую бронзу, содержащую 8% олова и 4% цинка, остальное — медь. В аппаратостроении наибольшее распространение получили оловянистые и специальные безоловянистые бронзы. Оловянистые бронзы Бр010, БрОЦ10-2 и БрОЦ8-4 отличаются хорошими технологическими свойствами, прочны, хорошо отливаются и паяются, устойчивы против атмосферной коррозии. Они применяются для изготовления ответственных деталей аппаратов, насосов и арматуры, работающих при давлениях до 15 ат и температурах до 250°С.

В теплообменных аппаратах нашли применение также следующие сплавы цветных металлов.

Мельхиор — медноникелевый сплав МН70-30 (70% меди, 30% никеля) используют для труб теплофикационных теплообменников и конденсаторов, работающих на морской воде.

Сплав свинца с сурьмой применяют для отливки деталей, соприкасающихся с растворами серной кислоты концентрации до 60% при малых давлениях.

Если отливка должна быть легкой и иметь хорошие технологические свойства при умеренной прочности, применяют сплавы алюминия с кремнием — **силумины**.

К сплавам цветных металлов относятся и **припои**. Припоем называют металл или сплав, служащий для соединения металлических частей в одно целое пайкой. Припои разделяют на мягкие — с температурой плавления от 183 до 280°С и твердые — от 600 до 1000°С. Мягкие припои (ГОСТ 1499-54) имеют оловянистоцинковую основу (припой оловянистоцинковый — ПОС). Твердые припои в сплаве имеют основу медь и цинк или серебро (ГОСТ 1534-42 и 8190-56).

Низкие температуры оказывают отрицательное влияние на механические свойства многих металлов. Углеродистые стали, особенно кипящие, становятся при минусовых температурах хрупкими, при этом несколько снижается их пластичность (относительное удлинение и сужение) и повышаются пределы прочности и текучести. Стали ферритного и полуперлитного классов — 0Х13, 1Х13, Х17 и Х25 — не должны применяться для работы при низких температурах из-за их хладноломкости.

Хорошо сопротивляется динамическим нагрузкам при минусовых температурах спокойная углеродистая мартеновская сталь, раскисленная повышенным количеством алюминия; присадка марганца и никеля также способствует повышению ударной вязкости сталей. Не проявляют хладноломкости хромоникелевые стали аустенитного класса, например сталь Х18Н9Т.

Сварные швы на стальных изделиях отличаются обычно при низких температурах пониженной ударной вязкостью по сравнению с основным металлом. Изделия, работающие при низких температурах, следует сваривать с обязательным предварительным или сопутствующим подогревом. Сварные швы, предназначенные для работы при низких температурах, подвергают отпуску.

Ударная вязкость также снижается у чугуна при низких температурах, однако в меньшей степени, чем ударная вязкость стального лития.

Пределы прочности и упругости, пластичность и твердость алюминия, меди и никеля с понижением температуры возрастают. Пластичность швов на меди и на латуни при низких температурах не только не ухудшается, а даже улучшается, что выгодно отличает эти металлы от стали.

Облучение металлов в реакторах. При выборе металлов для изготовления элементов охлаждения атомных реакторов необходимо считаться со способностью металлов поглощать нейтроны [Л. 7, 27]. Изменение свойств металла в результате облучения вызывается столкновением нейтронов большой энергии или осколков атомов с атомами металла, в результате чего образуются вакансии и дислокации. В результате деления атомов или захвата нейтронов ядрами атомов облучаемого металла в нем появляются новые атомы — примеси. Вследствие этих изменений структуры металла его пластичность и ударная вязкость резко снижаются, а предел текучести и твердость повышаются. С повышением температуры изменение механических свойств металла в результате облучения сказывается в меньшей степени.

Для сравнения влияния облучения испытывают трубы из разных металлов, но равного внутреннего диаметра и равной прочности, и сопоставляют их способность поглощать нейтроны. Такие данные для металлов, получивших наибольшее применение при изготовлении реакторов, приведены в табл. 9-4.

Алюминий и магний трудно защищать от коррозии при высоких температурах. С повышением рабочей температуры прочность их быстро снижается, и поэтому в мощных реакторах их применять нельзя. Аустенитные стали и цирконий более перспективны как конструкционные материалы для реакторов, однако при применении ста-

Относительное поглощение нейтронов некоторыми металлами

Металлы	Относительное поглощение нейтронов, $1 \text{ см}^2 \cdot 10^6$	Относительное поглощение нейтронов для труб равной прочности при 20°C	Точка плавления, °C
Магний	3,5	10	650
Алюминий	13	102	658
Сталь Х18Н9	226	234	~1500
Цирконий	12,6	16	~1780

ли производительность реактора снижается из-за сильного поглощения нейтронов.

Наиболее перспективен для изготовления охлаждающих элементов реакторов чистый цирконий или цирконий, легированный никелем и железом.

9-7. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ В ХИМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЕ

Влияние среды на коррозию

Металлические элементы теплообменных аппаратов подвергаются коррозионному разрушению.

Безводные растворы серы и органических сернистых соединений не взаимодействуют с углеродистыми сталями, но разрушают медь.

Сухие кислород и сероводород при комнатной температуре не взаимодействуют со сталью, алюминием, свинцом и цинком, однако даже небольшое содержание влаги сильно повышает агрессивность среды. При повышении температуры взаимодействие активизируется.

Нефть, содержащая сероводород, влагу и кислород, вызывает коррозию углеродистых и низколегированных сталей и меди. Стали Х18Н9Т, Х18Н12М2Т и Х18Н25С не корродируют в ней. Коррозия в газообразной среде протекает более интенсивно, чем в жидкой. В такой среде стали Х18Н9Т, Х18Н12М2Т и Х18Н25С подвержены язвенной коррозии. По коррозионной стойкости стали Х17 и Х25Т являются полноценными заменителями сталей Х18Н9Т и Х18Н12М2Т, однако существенно уступают им по технологичности.

Высокохромистые стали можно с успехом применять для изготовления сварной химической аппаратуры, работающей при статических нагрузках в уксусной, фосфорной и азотной кислотах, щелочах и многих других агрессивных средах. Добавка к хромистой стали алюминия и кремния повышает ее устойчивость в среде, содержащей серу.

Широкое применение в горячих аппаратах, перерабатывающих нефть с большим содержанием серы, нашли стали 0Х13 и 1Х13. Их применяют в качестве облицовочного материала и для внутренних устройств (тарелок, колпачков и т. п.). Алюминий, свинец, цинк и олово устойчивы в высокосернистых средах.

Сухой сернистый ангидрид (SO_2) не вызывает коррозии углеродистой стали, однако содержание 0,1% влаги приводит к интенсивной коррозии даже при комнатной температуре. В среде с влажным сернистым ангидридом рекомендуют применять чугуны с содержанием 14% Ni, 6% Cu и 3% Cr. Хорошо работают в этих условиях стали типов ЭИ171 и ЭИ183, а при низких температурах также латуни и бронзы. Агрессивность сернистого ангидрида возрастает с повышением температуры.

Нафтеновые кислоты вызывают очень интенсивную коррозию при 250—375°С. Сильнее всего разрушается свинец. Если коррозию свинца в нафтенных кислотах принять за 100, то скорость коррозии других металлов расположится в следующей последовательности: цинк 41, медь 3, олово 2, железо 1, алюминий 0.

Соляная кислота разрушает сталь и чугун. Хорошо сопротивляются коррозии в растворах соляной кислоты при комнатной температуре высококремнистые чугуны, содержащие 14% кремния, типа ферросилида (ГОСТ 1415-61), однако они разрушаются в горячей соляной кислоте. Присадка к этому чугуну 3,5—4% молибдена делает его устойчивым в горячей соляной кислоте. Такой чугун называется антихлором.

Стали типа 0Х18Н9 и Х18Н9Т устойчивы в растворах соляной кислоты низкой концентрации (до 3,5%) при комнатной температуре. Медные сплавы более устойчивы в соляной кислоте, чем сплавы на основе железа. Высокой коррозионной стойкостью в соляной кислоте отличаются латуни ЛО70-1 и ЛО60-1.

Для изготовления аппаратуры, предназначенной для выпаривания кислот в вакууме и для обработки продуктов парами соляной кислоты, используют сплавы никеля с молибденом и кремнием, а также с хромом и молибденом. Сплав ЭИ460 (68% Ni, 28% Mo, менее 0,12% C, бесталное железо) предназначен для работы в контактах с растворами соляной и серной кислот и устойчив в растворах этих кислот любой концентрации при комнатной температуре. Во влажном хлоре и в азотной кислоте сплав коррозионной стойкостью не отличается.

Свинец устойчив в соляной кислоте при низких температурах, но сильно корродирует при нагревании. Алюминий и его сплавы неустойчивы в соляной кислоте, так как образующийся на поверхности хлористый алюминий растворяется в воде.

Сухой хлористый водород практически не разъедает при комнатной температуре углеродистой стали, чугуна, легированных сталей и алюминия, однако с повышением температуры коррозионные процессы получают развитие.

Серная кислота широко используется в нефтеперерабатывающей промышленности. При концентрации более 75% она образует на поверхности сталей и чугунов окисные пленки, предохраняющие металл от разрушения при комнатных температурах. Однако дымящаяся серная кислота действует на сталь очень интенсивно, так как не образует окисных пленок. Чугун корродирует слабее стали, так как SO_3 , взаимодействуя с кремнием чугуна, образует SiO_2 . Объем окиси кремния больше объема кремния, что приводит к образованию трещин. Слабая серная кислота интенсивно разъедает сталь.

В серной кислоте низкой концентрации очень устойчив свинец, на поверхности которого образуется нерастворимая пленка PbSO_4 . Дымящаяся серная кислота растворяет пленку PbSO_4 , и свинец корродирует.

Весьма устойчивы в горячей серной кислоте большой концентрации никелемедистые (70% Ni, 30% Cu), никелемолибденовые сплавы (53% Ni, 22% Mo, 22% Fe) и никелемедехромистый чугун (14% Ni, 6% Cu, 4% Cr). Наиболее устойчив ферросилид — чугун с 14% кремния.

В среде фосфорной кислоты, применяемой в качестве катализатора, устойчивы никелемедистые сплавы типа монель-металла (70% Ni, 30% Cu), а также сплав состава 51% Ni, 19% Mo, 17% Cr и 5% W.

В растворах щелочей достаточной стойкостью отличаются в большинстве случаев углеродистые стали. Горячая щелочь способна приводить деформированный и напряженный металл к растрескиванию (явление каустической хрупкости). В этом случае приходится прибегать к облицовке аппаратуры сплавом 70% Ni и 30% Cu или чистым никелем, особенно при температуре среды выше 300°С. Для работы в щелочных средах непригодны медь, медные сплавы, алюминий, цинк, свинец и олово, на поверхности которых образуются гидраты окислов, хорошо растворяющиеся в щелочах.

Защита металлов от коррозии

Защита углеродистых сталей от коррозии металлическими покрытиями и окисными пленками позволяет экономить дефицитные цветные металлы [Л. 41, 55]. Сущность методов нанесения защитных металлических и неметаллических покрытий заключается в создании на поверхности металлов пленок, отличающихся значительно более высокой коррозионной стойкостью, чем основной металл. Защитные покрытия должны удовлетворять следующим основным требованиям: сплошность, непроницаемость, высокая прочность сцепления с основным металлом, высокая твердость, износостойкость и равномерное распределение по поверхности. Перед нанесением защитного слоя поверхность металла должна быть хорошо очищена механически и обезжирена веной известью, бензином, керосином или щелочными растворами.

Различают следующие основные методы нанесения металлических покрытий: гальванический, распыление (металлизация), диффузионный, погружение в расплавленный металл, механико-термический (плакирование), оксидирование, химическое никелирование и фосфатирование.

Гальванические покрытия осуществляются выделением металлов из водных растворов солей при воздействии постоянного электрического тока и осаждением этих металлов на поверхности защищаемых изделий. Покрываемые изделия являются катодами (—). Пластины осаждаемого металла (растворимые аноды), пластины графита или неосаждаемого металла (в солях) могут служить анодами (+). В химическом машиностроении применяют обычно анодные покрытия цинком и кадмием, реже — катодные покрытия никелем, хромом и свинцом.

При металлизации предварительно расплавленную в ацетилено-кислородном пламени или в электрической дуге стальную, цинковую или алюминиевую проволоку распыляют струей сжатого воздуха или инертного газа на мельчайшие частицы, которые, ударяясь о поверхность, подлежащую защите, сцепляются с ней и образуют покрытие толщиной 0,4—0,5 мм (можно покрывать металл, де-

рево, бетон, керамику и т. д.). Расплавление и распыление производятся специальными аппаратами — металлизаторами. Чешуйчатая структура застывающих брызг металла делает покрытие пористым и не очень стойким против коррозии. Поэтому металлization нашла применение главным образом для защиты от атмосферной коррозии.

Диффузионные покрытия образуются путем диффузии наносимого вещества из твердой или газообразной фазы в глубь защищаемого материала. Диффузия протекает при высокой температуре, иногда в вакууме или в токе водорода, в нейтральной или в восстановительной атмосфере. Такие покрытия отличаются большей коррозионной стойкостью и большей износостойкостью, чем гальванические и металлizationные. В качестве покрывающего металла нашли применение алюминий, кремний, хром и цинк, а в последнее время и титан.

Алитирование стали — получение твердого раствора алюминия в железе (20—30% Al) — производится путем взаимодействия железа с расплавленным алюминием при 950°С в течение 3—4 ч. Глубина алитирования составляет 0,3—0,8 мм.

Диффузионное силицирование стали производится путем насыщения поверхности стали кремнием при помощи порошкообразных материалов в среде расплавленных электролитов и в газовой фазе. Процесс протекает при температуре 1000—1200°С. Толщина слоя кремния, пролифундировавшего в сталь, составляет 0,1—0,4 мм. Силицирование повышает не только коррозионную стойкость, но и износостойкость стали.

Термохромирование производится выдерживанием деталей при высокой температуре в порошкообразных материалах или в атмосфере, содержащей пары солей хрома. На поверхности получается твердый раствор Fe—Cr. При этом повышается жаростойкость и твердость изделия.

Горячие покрытия образуются путем погружения защищаемого металла в расплавленный покрывающий металл, который смачивает поверхность изделия. Сталь покрывают цинком ($t_{пл} = 419^\circ\text{C}$), оловом ($t_{пл} = 232^\circ\text{C}$), свинцом ($t_{пл} = 327^\circ\text{C}$). В химическом машиностроении горячим свинцом покрывают мешалки, краны, вентили и арматуру. Для лучшей смачиваемости в расплав добавляют сурьму или олово либо лудят предварительно изделие оловом. Толщина слоя свинца составляет 0,5—2 мм.

Плакирование или облицовка металла более коррозионно-стойким является наиболее совершенным способом защиты от коррозии. Плакирование осуществляется путем совместной прокатки или горячей прессовки двух металлов, из которых один, химически более стойкий, предназначен защищать другой — основной конструкционный материал. Так, аппарат из обычной углеродистой стали можно защищать листами аустенитной хромоникелевой стали, никелем, танталом или титаном. Толщина защитного слоя составляет обычно 10—20% толщины основного. Двухслойную (плакированную) сталь начали широко применять в химическом машиностроении.

Окислирование черных металлов известно также под названием воронения. Сущность окисливания заключается в создании на поверхности металла слоя окислов, которые отличаются более высокой коррозионной стойкостью, чем основной металл. Окисдные пленки могут быть получены различными способами. Наибольшее распространение получило щелочное окисливание стали, осуществляемое в растворе следующего состава: 650—700 г едкого натра,

200—250 г нитрата натрия, 1 л воды. В этом растворе изделие кипятят при температуре 137—140°С.

Более стойкая оксидная пленка получается при кислотном окислировании в растворе следующего состава: 40—50 г азотнокислого бария, 3—5 г фосфорной кислоты, 1 л воды.

Окислируют изделия как из стали, так и из цветных металлов: алюминия, магния и их сплавов, реже меди и ее сплавов.

Фосфатирование стали заключается в обработке стальных деталей в горячем растворе фосфорнокислых солей некоторых металлов (Mn, Fe и др.), в результате чего на поверхности металла образуется пористая и хрупкая пленка. Эта пленка от коррозии не защищает, но она служит прекрасным грунтом для лакокрасочных покрытий.

В последние годы развивается химическое никелирование, т. е. никелирование без участия электрического тока. Процесс заключается в получении защитного никелевого покрытия путем восстановления никелевых солей гипофосфатом натрия, калия или кальция при температуре 90—92°С. На поверхности некоторых металлов (Fe, Ni, Al, Zn) получается сплав, состоящий из твердого раствора никеля и интерметаллического соединения Ni_3P , не уступающий по твердости хрому.

Специальные лакокрасочные покрытия являются наиболее доступными и эффективными средствами защиты металлических изделий от коррозии и разрушения. Они нашли широкое применение в машиностроении. В настоящее время более половины всех металлических изделий защищают от коррозии лакокрасочными покрытиями. Подбирая лакокрасочные материалы с хорошей адгезией (сцеплением), используя одновременно защитные свойства одного и эффективные качества другого лакокрасочного слоя, можно получить многослойные комбинированные покрытия, превышающие по стойкости металлические материалы. Защитные свойства лакокрасочного покрытия обусловлены тем, что после окраски на поверхности материала образуется сплошная пленка, изолирующая поверхность от окружающей агрессивной среды и предохраняющая его тем самым от разрушений. Так, широко распространенные асфальтовые и битумные материалы эффективно защищают металлические поверхности от щелочей и кислот. Применяются фенолформальдегидные (резольные) лаки, перхлорвиниловые лакокрасочные материалы и лаки на основе эпихлоргидриновых смол. Для защиты от особо агрессивных сред используются фторопласт-3 и фторопласт-3М.

Обкладка химической аппаратуры резиной и эбонитом (гуммирование) широко применяется в химической промышленности. Резину применяют для обкладки аппаратов, подвергающихся сотрясениям, ударам или частым изменениям температуры. Эбонит применяют в тех случаях, когда аппараты работают при постоянной температуре, и при отсутствии механических воздействий, но при повышенной химической активности среды. По коэффициенту теплового расширения эбонит меньше отличается от металла, чем резина, но он менее эластичен, чем резина, и поэтому шее сцепления эбонита и резины с металлом применяют эбонитовый, термопреновый, хлоркаучуковый и другие клеи — в большинстве материалов на основе каучука, растворенного в бензине [Л. 41].

Существуют различные способы покрытия химической аппаратуры резинами. Основной — обкладка поверхности одним, двумя или

более слоями сырой листовой резины с последующей ее вулканизацией на месте. Предварительно поверхность металла очищают пескоструйным аппаратом для придания ей шероховатости, обмывают бензином и смазывают резиновым клеем. Затем накладывают сырую резину и прокатывают ее деревянными роликами для удаления воздуха и устранения неплотностей. Вулканизация закрытым способом производится паром давлением 3—4 ат в течение 8—9 ч, вулканизация открытым способом (больших емкостей) — путем заполнения сосуда раствором, температура кипения которого при 1 ат выше 100° С. Раствор нагревают перегретым паром или горячим воздухом.

Технология покрытия эбонитом аналогична.

Гуммирование химической аппаратуры связано с некоторыми специфическими особенностями нанесения резиновых обкладок, так как не все конструкции аппаратов и их деталей позволяют применять этот способ защиты. Резина отличается хорошей адгезией по отношению к стали, чугуну, олову, цинку и хрому. При гуммировании свинца и алюминия ускоряется процесс старения резины. Медь непригодна для гуммирования вследствие того, что образующийся на поверхности металла порошкообразный сульфид не пристает ни к меди, ни к резине и действует разрушающе на резину. Поэтому перед гуммированием медь покрывают полудой. Особенно прочные покрытия получают на латуни. Поэтому иногда сталь покрывают перед гуммированием латунью. При гуммировании чугуна получают менее прочные покрытия, чем при гуммировании листовой стали. Сварные конструкции лучше поддаются гуммированию, чем клепаные; стальное литье гуммировать не рекомендуется, так как его поверхность часто бывает пористой.

Аппараты больших размеров, подлежащие гуммированию, рекомендуется изготавливать разъемными с фланцевыми соединениями; если аппарат нельзя изготовить разъемным, в его корпусе должен быть предусмотрен люк или лаз. Верхнюю кромку аппарата выполняют закругленной, острые углы в аппарате и его деталях, подлежащих обкладке резиной, не допускаются; радиус закругления краев и углов деталей должен быть не менее 5 мм.

9-8. НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Кроме широкого внедрения новых металлов, в аппаратостроении получили значительное распространение неметаллические материалы [Л. 41, 55]. Только применение неметаллических материалов для изготовления теплообменных аппаратов позволило осуществить такие процессы, как хлорирование, бромирование и производство синтетического спирта.

Неметаллические материалы, используемые при изготовлении теплообменной и химической аппаратуры, должны отличаться высокой химической стойкостью, непроницаемостью для газов и жидкостей, достаточной теплопроводностью, термической устойчивостью, прочностью, небольшим объемным весом, хорошей сцепляе-

мостью с другими материалами и хорошей обрабатываемостью. Совокупностью этих свойств не обладает, естественно, ни один из неметаллических материалов. Поэтому при изготовлении теплообменных аппаратов для удовлетворения техническим требованиям часто используют несколько видов материалов.

В производстве теплообменной аппаратуры используют как неорганические, так и органические неметаллические материалы. К неорганическим материалам относятся: горные породы, искусственные силикатные материалы, получаемые плавлением горных пород (каменное литье, плавленый кварц, стекло, эмаль), керамические материалы, получаемые спеканием, вяжущие силикатные материалы (цементы, бетоны и др.). К органическим материалам относятся: непластические материалы (древесина, уголь, графит), пластические массы (конденсационные, полимеризационные, асфальтобитумные композиции), вяжущие материалы (арзамиты), материалы на основе каучука и лакокрасочные материалы. В ряде случаев применяют комбинированные материалы обеих групп: фаолит, асбовинил, стеклотекстолит и др. Ниже приведена краткая характеристика основных свойств и назначения некоторых неметаллических материалов, применяемых для изготовления теплообменной аппаратуры.

Силикатные материалы

Кварцевое стекло (плавленый кварц) нашло применение в качестве кислотостойкого материала в виде непрозрачного плавленого кварца, отличающегося от прозрачного присутствием в его массе мелких газовых пузырьков. Сырьем для изготовления плавленого кварца служит кварцевый песок высокой чистоты. Кварцевое стекло отличается высокой термической стойкостью: длительное его применение допустимо при температурах до 1 000° С, кратковременное — до 1 300—1 400° С. Теплопроводность кварцевого стекла составляет $6\text{—}11 \text{ ккал/м} \times \text{ч} \cdot \text{град}$. Его коэффициент линейного расширения в 6 раз меньше, чем фарфора, и в 12—20 раз меньше, чем простого силикатного стекла. Кварцевое стекло отличается высокой электроизоляционной способностью. Оно устойчиво по отношению ко всем минеральным и органическим кислотам любых концентраций (кроме плавиковой

и фосфорной). Поэтому во многих случаях им заменяют цветные металлы, а иногда даже серебро и платину.

Из непрозрачного кварцевого стекла изготавливают трубы длиной до 1500 мм при диаметре до 300 мм, аппараты для работы под вакуумом и под давлением до 3—4 ат, цагги для колонн диаметром до 700 мм и длиной до 1500 мм, S-образные холодильники, футеровочные плиты и другие детали.

Силикатное стекло представляет собой сплав песка, кальцинированной соды, сульфата натрия, поташа и некоторых других компонентов. Теплопроводность стекла невысока и составляет $0,65 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$, термостойкость — до $300\text{—}350^\circ \text{C}$. Силикатное стекло — коррозийностойкий, но очень хрупкий материал. Из него изготавливают трубы, колена, отводы и тройники для агрессивных жидкостей, футеровочные плиты, ткань.

Каменно-керамические изделия получают обжигом до спекания (при температуре до 1300°C) различных природных силикатных материалов и присадок, снижающих температуру плавления шихты. Основным сырьем для производства каменно-керамических изделий служат глина, измельченный шмот, полевой шпат и кварцевый песок. Каменно-керамические изделия отличаются высокой химической стойкостью по отношению к большинству агрессивных сред, высокой термостойкостью и огнеупорностью до 1500°C ; их теплопроводность невелика: $0,9\text{—}3,5 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$. Каменно-керамические детали применяют при изготовлении керамических башен, колонн, труб, кранов, насосов и вентиляторов для агрессивных жидкостей и газов, а также толстостенных баллонов для перевозки и хранения жидкостей. Большое распространение получили теплообменные керамические аппараты для химической промышленности: холодильники, конденсаторы и подогреватели.

Фарфоровые изделия относят к группе тонкокерамических. Теплопроводность фарфора $0,25 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$. Применяемый в химической промышленности твердый фарфор получают обжигом при $1300\text{—}1450^\circ \text{C}$ смеси глины (до 55%), кварца (до 30%) и полевого шпата (до 30%). Из фарфора изготавливают футеровочные плиты, насадки башен, варочные котлы, травильные ванны, вакуум-аппараты, трубы, змеевики, краны и даже насосы. Аппаратура из фарфора применяется там, где требуется особая чистота продукции.

Углеродистые материалы

Вследствие высокой химической стойкости и хорошей теплопроводности уголь и графит получили распространение в качестве материалов для изготовления теплообменных аппаратов химической промышленности.

Природные уголь и графит загрязнены примесями, неоднородны по составу, недостаточно прочны и поэтому не применяются. Для изготовления искусственного угля в качестве исходного сырья применяют нефтяной и каменноугольный кокс, реже антрацит и графит. Промытый соляной кислотой для удаления золы и прокаленный углеродистый материал в виде порошка смешивают с каменноугольным пеком и антрацитовым маслом, прессуют под давлением $200\text{—}1500 \text{ ат}$ в изделия или блоки, а затем подвергают обжигу без доступа воздуха при температуре $1350\text{—}1400^\circ \text{C}$ в течение 6—10 суток. В процессе обжига связующее вещество массы превращается в кокс, происходят спекание и усадка угольной массы, удаляются летучие, и масса превращается в монолит. Предел прочности угольных блоков при растяжении составляет $26\text{—}59 \text{ кгс/см}^2$, при сжатии $134\text{—}138 \text{ кгс/см}^2$, при изгибе $56\text{—}117 \text{ кгс/см}^2$. К недостаткам угольных изделий и блоков относятся их высокая пористость (22—25%) и относительно низкая теплопроводность ($\sim 30 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$).

Искусственный графит отличается высокой степенью чистоты (99% углерода и выше), по теплопроводности в 3—8 раз превосходит уголь и по химическим свойствам занимает особое положение в ряду других материалов: кислоты, щелочи и растворы солей в обычных условиях на него не действуют, он растворяется только в расплавленных металлах и разрушается только сильными окислителями. Графитовые изделия, так же как и угольные, отличаются высокой пористостью, и поэтому область их применения в химическом аппаратостроении ограничена. Пористость можно устранить пропиткой угля и графита фенолформальдегидными смолами, главным образом резольными. Термостойкость углеродистых изделий, пропитанных фенолформальдегидной смолой, не превышает 130°C .

В СССР широкое распространение получил новый материал на основе графита и смол — антегмит АТМ-1 — порошок, из которого изделия получают прес-

Таблица 9-5

Техническая характеристика непропитанного и пропитанного графита и антегмита АТМ-1

Характеристики	Графит		Антегмит АТМ-1
	до пропитки	после пропитки	
Удельный вес, $г/см^3$	2,25	2,07	1,93
Объемный вес, $г/см^3$	1,57	1,85	1,35
Открытая пористость, %	27,2	0	—
Привес после пропитки, %	—	15,2	—
Предел прочности:			
при растяжении, $кгс/см^2$	70	178	250
при сжатии, $кгс/см^2$	260	1 850	—
Температурный предел применения, $^{\circ}C$	400	180	130
Теплопроводность, $ккал/м \cdot ч \cdot град$	—	—	32

сованием в горячих формах. После формовки изделия не требуют дополнительной обработки. Если изделие должно иметь повышенную химическую стойкость и теплоустойчивость, его подвергают после формовки термической обработке.

В табл. 9-5 приведены характеристики графита до и после пропитки фенолформальдегидной смолой и антегмита АТМ-1.

Из пропитанного угля, графита и антегмита изготовляют плиты, блоки, трубы и соединительные части к ним, арматуру и другие детали теплообменников.

Пластические массы

Пластмассы отличаются достаточной прочностью, высокой химической стойкостью в агрессивных средах, водонепроницаемостью, тепло- и морозостойкостью и малым удельным весом. В аппаратостроении получили применение пластмассы на основе конденсационных и полимеризационных смол и битумов [Л. 41].

Пластические массы на основе конденсационных смол получают в результате реакции конденсации, т. е. образования нового соединения из

двух молекул различных исходных веществ. Таким путем получают фенолформальдегидные смолы, на основе которых можно создавать прочные и химически стойкие материалы: фаолит, текстолит, текстолит, стеклотекстолит и фенолит, а также некоторые лаки, мастики и арзамиты (вяжущие вещества), применяемые для футеровки, обмазки и склеивания.

Фаолит (А и Т) представляет собой продукт смешения фенолформальдегидной резольной смолы (на щелочном катализаторе) с асбестом или графитом, служащими наполнителями. Фаолит устойчив в кислотах, растворах многих солей, некоторых органических соединениях и газах (хлоре, сернистом газе). Основные свойства фаолитов: удельный вес 1,5—1,65 $кг/см^3$; коэффициент линейного расширения $2 \cdot 10^{-5}$; предел прочности при растяжении 145,5 $кгс/см^2$; водопоглощение за 24 ч 0,3—0,5%; теплопроводность: фаолит А—0,25, фаолит Т—0,90 $ккал/м \cdot ч \cdot град$; теплостойкость 100 $^{\circ}C$.

Изделия из фенолформальдегидных смол могут быть получены методами литья, формования и прессования. Из сырой фаолитовой массы прессуют листы, трубы, вентили, задвижки и другие детали. Затем их обрабатывают путем нагревания в течение 30 ч при 130 $^{\circ}C$, в результате чего резольная смола переходит в твердое неплавкое и нерастворимое вещество—резит. Фаолитовые изделия можно подвергать обточке, сверлению или шлифованию. Фаолит хорошо склеивается встык или внахлестку фаолитовой замазкой, и поэтому из фаолита изготовляют емкостные сосуды, реакторы, ректификационные колонны, трубопроводы, мешалки, холодильники, насосы и вентиляторы. Листовой фаолит широко применяется для футеровки металлической химической аппаратуры.

Текстолит представляет собой прессованный материал из хлопчатобумажной ткани или из иного слоистого материала, пропитанного резольной смолой, и отвержденный при температуре до 130 $^{\circ}C$. В химическом аппаратостроении из текстолита изготовляют трубы, текстолитовой тканью обматывают детали с последующей термической обработкой.

Текстофаолит представляет собой несколько слоев фаолита с промежуточной обмоткой слоев хлопчатобумажной тканью или с наружным слоем из текстолита. Предел прочности текстофаолита при растяжении—до 1 000 $кгс/см^2$, при изгибе—до 1 600 $кгс/см^2$;

водопоглощение за 24 ч — 0,6—0,8%; теплопроводность 0,20—0,29 ккал/м·ч·град; теплостойкость до 125°С. Из текстофалитовых царг изготавливают трубы, предназначенные для выброса агрессивных кислых газов с температурой до 120°С.

Стеклотекстолит — слоистый материал, сходный с текстолитом, но изготовленный на основе стеклянной ткани и обработанный термически при 150°С. Этот материал прочнее текстолита, не усыхает и не разбухает, легко поддается механической обработке на станках; из него изготавливают детали насосов, лопасти мешалок и другие детали, работающие с повышенной механической нагрузкой.

Фенолит изготавливают путем прессования смеси фенолформальдегидной и полихлорвиниловой смол при 180°С. Фенолит прочен, устойчив в некоторых кислотах и щелочах, отличается повышенной теплостойкостью и водостойкостью. Из фенолита изготавливают трубы, фасонные части для их соединения, арматуру, насосы, воздухопроводки и футеровочные изделия.

Арзамит — вяжущий материал, получаемый смешением резольной смолы в присутствии бензиловой кислоты с порошкообразным наполнителем (кремнеземом, графитом, сернокислым барием) и катализатором (паратолуолсульфохлоридом). Арзамиты используют в качестве вяжущего материала при футеровке химической аппаратуры различными плитами.

Кремнийорганические соединения (силиконы), получаемые на основе арилхлорсиланов (например RSiCl_3 , R_3SiCl), сочетают преимущества неорганических и органических материалов. Эти смолы характеризуются химической стойкостью и теплостойкостью, присущими силикатным материалам, и высокой эластичностью, присущей органическим веществам. Силиконы представляют собой твердые смолы, каучукообразные вещества, масла или жидкости. В виде жидкостей они отличаются текучестью в интервале температур от —100 до +400°С; в виде каучукообразных продуктов они сохраняют эластичность в пределах от —40 до +200°С. В сочетании со стеклянной тканью силиконы образуют стеклотекстолиты. Пластические массы из кремнийорганических смол получают путем смешения с наполнителями и другими добавками (асбестом, алюминиевым порошком и др.). Силиконовые пластмассы

применяют для изготовления отдельных деталей и корпусов приборов и в качестве прокладочных и уплотнительных материалов для высокотемпературного оборудования, а также в качестве теплоустойчивых, коррозионноустойчивых и электроизоляционных масс.

Пластические массы на основе полимеризационных смол получают путем реакции полимеризации, т. е. уплотнением нескольких однородных молекул в одну сложную молекулу. Из полимеризационных материалов наибольшее распространение в аппаратостроении получили полихлорвиниловые смолы, полиизобутилен и асбовинил.

Полихлорвиниловый пластикат (смола с пластификатором), изготавливаемый вальцеванием и каландрированием в виде мягких, гибких листов и лент, применяется для облицовки химической аппаратуры в производстве серной, азотной, соляной и других сильных кислот. Пластикаты химически устойчивы и водонепроницаемы, однако они отличаются слабой термостойкостью (60—70°С) и малой сцепляемостью с металлами, что ограничивает их применение.

Винипласт — продукт горячего прессования (при 150—160°С) в твердую пластическую массу полихлорвиниловой смолы с присадками стабилизаторов (аминов, окислов металлов, металлических мыл) и мягчителей (стеарина, парафина, трансформаторного масла). Физические свойства винипласта: теплопроводность при 20°С — 0,1 ккал/м·ч·град, удельная теплоемкость — около 0,5 ккал/кг·град, теплостойкость до 65°С, морозостойкость до —20°С. Винипласт склонен к ползучести и к набуханию в воде, при этом его механические свойства снижаются.

Винипласт хорошо поддается обработке резанием. Его можно обтачивать, строгать, сверлить, фрезеровать, шлифовать, полировать и сваривать. Под действием струи горячего воздуха с температурой 200—220°С винипласт размягчается, становится пластичным и приобретает способность свариваться при небольшом давлении. При нагреве до 130—140°С винипласт может быть сварен с помощью стержня из полихлорвиниловой смолы. Арматуру и изделия из винипласта можно ремонтировать путем заварки поврежденных мест, что значительно снижает эксплуатационные расходы и увеличивает срок службы изделий. Изделия из винипласта можно

склеивать растворами перхлорвиниловой смолы с достаточно высоким пределом прочности при растяжении ($30\text{--}40 \text{ кгс/см}^2$).

Как показал опыт эксплуатации, благодаря их высокой химической стойкости изделия из винипласта превзошли такие антикоррозионные материалы, как фаолит, текстолит, кислотостойкую резину и др. В ряде случаев винипласт заменяет цветные металлы (свинец, бронзу, медь) и нержавеющей сталь. Из винипласта изготавливают чарги для аппаратов, арматуру, трубы, соединительные патрубки, вентиляционные короба и детали насосов и вентиляторов, а также пленку, листы и стержни для различных изделий. Винипласт может применяться также в качестве футеровочного материала для защиты аппаратуры от действия агрессивных сред.

Лаки и эмали на основе полихлорвинила получили распространение в качестве антикоррозионных покрытий. Растворы перхлорвиниловой смолы (полихлорвинил с повышенным содержанием хлора) — лаки — применяют для защиты от коррозии электролизных ванн, скрубберов для сернистого газа, хранилищ серной кислоты и др. Промышленность выпускает химически стойкие перхлорвиниловые лаки и эмали марок: грунт ХСГ-3, эмаль ХСЭ-14, эмаль ХСЭ-26, лак ХСЛ, лак ОНИЛХ-3 и др.

Полиизобутилены — продукты полимеризации изобутилена при температуре минус 100°C в присутствии катализатора. Полиизобутилены могут иметь различный молекулярный вес; с его увеличением их физические свойства существенно изменяются — от жидкости до каучукообразной массы. Выпускаются главным образом высокомолекулярные полиизобутилены типов П-100 и П-200 (число обозначает средний молекулярный вес в тысячах).

Удельный вес полиизобутилена — $0,93 \text{ кг/дм}^3$, морозостойкость — до минус 55°C ; при более низкой температуре возникает хрупкость. При нагревании до 100°C пластичность полиизобутилена возрастает, а прочность снижается. При $150\text{--}200^\circ\text{C}$ полиизобутилен сваривается; при $180\text{--}200^\circ\text{C}$ его можно формовать, а при $350\text{--}400^\circ\text{C}$ он разлагается.

В смеси с наполнителем (графитом, сажей и др.) полиизобутилены вальцуют в листы, применяемые в качестве обкладочного материала по металлу и по бетону

для защиты аппаратов и труб от агрессивных сред и в качестве эластичного материала для комбинированных футеровок. Из полиизобутилена изготавливают также эластичные трубы, служащие защитным слоем в трубах большого диаметра, выполненных из металла, бетона или других материалов. Недостатки полиизобутилена: низкая термостойкость ($50\text{--}60^\circ\text{C}$) и ползучесть на холоду, т. е. большие остаточные деформации при длительном действии сжимающих сил.

Фторопласты — пластические массы, получаемые путем полимеризации фтористых производных этилена. В качестве антикоррозионных материалов в аппаростроении получили применение фторопласт-4 и фторопласт-3.

Фторопласт-4 — рыхлый волокнистый порошок, превращающийся при спекании в плотную массу. По химической стойкости фторопласт превосходит благородные металлы и сплавы и не растворяется в кислотах даже при высокой температуре. Температурные пределы его применения — от минус 100 до плюс 250°C . Фторопласт-4 нехрупок и легко изгибается, а при давлениях $100\text{--}200 \text{ кгс/см}^2$ легко раскатывается с увеличением площади в $3\text{--}3,5$ раза без трещин и разрывов. Из спрессованной массы фторопласт-4 формованием в каландрах, строжкой из болванки и другими способами получают пленки, пластины, сильфоны, тонкостенные трубы, вентили и другие изделия. Фторопласт-4 сваривают путем предварительного размягчения при $380\text{--}390^\circ\text{C}$ и сжатия свариваемых частей под давлением до 510 кгс/см^2 . При температурах выше 400°C фторопласт-4 разлагается.

Фторопласт-3 выпускается в виде тонкого, рыхлого и легкосыпучего порошка. В отличие от фторопласта-4 он плавится при 210°C , и поэтому его можно применять при температурах не выше 70°C . При комнатной температуре фторопласт-3 тверже фторопласта-4. По химической стойкости фторопласт-3 незначительно уступает фторопласту-4, не смачивается водой и не набухает в ней; поддается прессованию и может отливаться под давлением. Фторопласт-3 получил применение как уплотнительный материал при высоких давлениях и как антикоррозионное покрытие в виде пленки.

Для изготовления защитных покрытий из высокополимерных материалов применяют асбовинил (до 100--

110°С), полистирол (до 85°С), полиэтилен (до 115°С) и др.

Пластические массы на основе битумов — битумно-пековые материалы — применяют в качестве вяжущих веществ, антикоррозионных покрытий и гидроизоляционной массы. В качестве конструкционных материалов битумно-пековые вещества нашли ограниченное применение, так как их теплостойкость невысока и механические свойства низки.

Каучуковые материалы

Синтетический и натуральный каучук образует в соединении с серой резину (2—3% S) или эбонит — твердую резину (40—50% S), которые нашли широкое применение в химическом машиностроении в качестве прокладок и обкладочного материала в сосудах, а также при изготовлении труб, гибких шлангов, мешалок, деталей насосов, арматуры, небольших сосудов и т. п.

Резина отличается высокой эластичностью и поэтому выдерживает без разрушения сильные деформации, смягчает ударные нагрузки и хорошо противостоит истиранию. Последнее свойство обуславливает широкое применение резины в аппаратах, работающих с суспензиями. Резина хорошо противостоит также воздействию многих агрессивных сред. Резина применяется при температурах не выше 75°С; в среде горячего воздуха резина стареет. В результате длительного взаимодействия с водой резина набухает.

Эбонит более устойчив химически, чем резина, меньше набухает в воде и отличается высокой твердостью, что позволяет изготавливать из него различные детали аппаратов.

9-9. МЕТАЛЛОПЛАСТ

Одним из современных видов покрытия металлов для защиты от коррозии являются пластмассы. Однако проблема прочного соединения металла и пластика явилась главной трудностью при разработке пластмассовых покрытий.

До сих пор покрытия металлов в виде лаков, красок и пластмасс наносятся на готовую деталь, так как невозможно покрыть металлический лист предварительно,

а затем свернуть его в трубу или выдавить из него на прессе сосуд; покрытие не выдерживает обработки давлением — растрескивается и «слезает» с листа. Изделие обходилось бы дешевле, если бы его производство организовать по принципу изготовления из уже защищенных от коррозии листов, труб или проката.

В 1953 г. был разработан и выпущен первый промышленный агрегат для покрытия (плакирования) металла пластмассовой пленкой. На основе эпоксидных смол и перхлорвиниловых смол НИИпластмасс разработал клей ПЭД-Б, который связал металл с полихлоридной пленкой. Природа сил, обеспечивающих сцепление клея с металлом и пластмассой, исследована еще не во всех деталях. Известно, что соединение клея с металлом в какой-то мере механическое: клей заполняет мельчайшие впадины в поверхности металла, как бы цепляясь за них. Поэтому поверхность для склеивания должна быть шероховатой. С пластиком соединяется перхлорвиниловая группа клея. По мере того, как улетучивается растворитель, клей буквально срастается с пленкой. Он не только соединяет ее с металлом, но и сам по себе является неплохим антикоррозионным покрытием. Применение металлопласта ограничивается температурой не выше +80°С и не ниже —50°С. Новый материал хорошо штампуются, гнется и обрабатывается резанием без повреждения пластмассового слоя. Для плакирования могут применяться также поливинилбутираль, полиамиды и полиэтилен, а также термореактивные смолы.

Из металла, покрытого поливинилхлоридом, изготовляют корпуса низкотемпературных теплообменников, цистерны, емкости и воздухопроводы. Металлопласт в 7—10 раз дешевле и в несколько раз долговечнее нержавеющей стали.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие требования предъявляются к конструкционным материалам теплоиспользующих аппаратов?
2. Перечислите достоинства и недостатки чугунов как конструкционного материала для сосудов под давлением.
3. Какими способами повышают качество чугунов?
4. Какое влияние на качество стали оказывают марганец, хром, никель, титан?
5. В каких случаях целесообразно применение высоколегированных сталей при изготовлении теплообменных аппаратов?

6. Назовите области применения меди и сплавов на медной основе.
7. Как влияют на свойства стали и меди низкие температуры?
8. Какие металлы отличаются наименьшей, и какие — наибольшей способностью поглощать нейтроны?
9. Перечислите способы защиты металлов от коррозии.
10. Объясните принципы процессов металлизации, плакирования, оксидирования и гуммирования.
11. Какие достоинства силикатных материалов используют в аппаратостроении?
12. Каковы конструкции аппаратов из углеграфитовых материалов?
13. Назовите пластмассы, получаемые на основе конденсационных смол, и области их применения в аппаратостроении.
14. Назовите пластмассы, получаемые на основе полимеризационных смол, и области их применения в аппаратостроении.
15. Каковы свойства каучуковых материалов? Для чего применяют резину и эбонит?
16. Что такое металлопласт?

Глава десятая

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

Выбор конструкционных материалов для проектируемого аппарата определяется особенностями протекающего в нем технологического процесса, свойствами рабочих веществ, их параметрами и характером механической нагрузки. В свою очередь технологические свойства конструкционного материала предопределяют способ изготовления из него деталей аппарата. Чугунные детали изготавливают методом литья; стальные — обычно из стандартных листов, сортового и фасонного проката и труб путем их резки, гибки, штамповки и последующей сварки заготовок; углеграфитовые изделия получают путем прессования, пропитки, склеивания и термической обработки; керамические аппараты формуют и обжигают. Все эти различия обусловлены технологическими возможностями литья, сварки, склеивания и других способов изготовления изделий сложной конфигурации.

Чугунные детали могут иметь сколь угодно сложную конфигурацию, однако изготовление тонкостенного литья встречает затруднения. Кроме того, в отливках нельзя допускать резкие переходы сечений, т. е. значительную

разнотолщинность отдельных частей отливки. Сложные стальные узлы могут сочетаться из элементов различной толщины; для их соединения необходимо применять сварку (или реже клепку). Чугун хорошо работает при сжимающих усилиях и поэтому может служить материалом опор, станин и поддонов, однако чугун не может служить материалом деталей, испытывающих значительные растягивающие напряжения.

Приведенные примеры показывают, что детали, изготовленные из различных материалов, отличаются своей формой; узлы и детали, изготовленные из одного и того же материала, но разными способами, также существенно отличаются по конфигурации.

10-1. КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛИТОЙ АППАРАТУРЫ

Металлическое литье — сложный металлургический процесс, однако применение литых деталей в аппаратостроении становится экономически выгодным при достаточно большом числе одинаковых отливок. До настоящего времени литье является одним из основных способов изготовления деталей сложной формы при поточном изготовлении теплообменных аппаратов.

При конструировании литых изделий следует стремиться к максимальной простоте модели, к удобству формовки и к созданию благоприятных условий для равномерного остывания всех элементов отливки. Скорость охлаждения отливки определяет структуру металла. Равномерность охлаждения достигается конструированием всех паружных стенок отливки одинаковой толщины. Внутренние стенки, перегородки и ребра находятся в худших условиях отдачи тепла формовочной земле, а поэтому для выравнивания скорости охлаждения их толщину принимают в пределах 0,7—0,8 толщины наружной стенки. При большой неравномерности остывания отливки возникают остаточные термические напряжения, образуются трещины, усадочные раковины, рыхлая структура металла. Толщина стенок отливки должна определяться в первую очередь условиями прочности, а также жидкотекучестью металла, особенностями формовки и размерами отливки. Наименьшая толщина отливок при литье в земляные формы приведена в табл. 10-1 [Л. 21]. При литье в металлические или корковые формы и при машинной формовке можно принимать меньшую

Наименьшая толщина отливок при литье в земляные формы, мм

Материал	Наименьшая толщина отливок		
	мелких	средних	крупных
Серый чугун	3—5	8—10	12—15
Ковкий чугун	2,5—4	6—8	—
Сталь	6	10—12	20
Сплавы цветных металлов	2—3	5—7	10—12

толщину стенок, однако, естественно, не меньше получаемой в расчетах на прочность. Из-за образования крупных включений графита при медленном охлаждении чугуна не рекомендуется отливать чугунные детали со стенками толщиной больше 50—60 мм. Для уменьшения веса литых аппаратов с сохранением их прочности и жесткости рекомендуется при конструировании деталей наряду с утонением стенок предусматривать ребра жесткости, добиваясь распределения нагрузки на возможно больший объем материала.

В большинстве случаев отдельные элементы аппарата несут разные механические нагрузки и поэтому из соображений равнопрочности должны иметь неодинаковую толщину. Правильно спроектированные отливки должны выполняться с постепенным увеличением толщины стенок в направлении улучшения отвода тепла. Разница в толщине сопрягаемых стенок отливки должна быть по возможности минимальной (рис. 10-1, а), а сопряжение плавным (рис. 10-1, в). Радиусы закругления при сопряжении стенок различной толщины должны

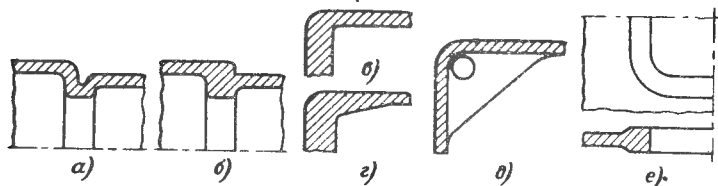


Рис. 10-1. Конструирование литой аппаратуры.

а — правильная конструкция стенок; б — неправильная конструкция стенок; в — правильное сопряжение стенок; г — неправильное сопряжение стенок; д — отверстие в ребре; е — правильное оформление края отверстия утолщением.

быть достаточно большими, но не настолько, чтобы создавать местные скопления металла и вероятность образования усадочных раковин и рыхлости. Общее число закруглений для сопряжения частей должно быть минимальным.

Установка ребер перпендикулярно линии сопряжения двух массивных частей отливки улучшает отвод тепла от места скопления металла на стенке и способствует более равномерному распределению нагрузки на всю деталь. Форма ребер и перегородок в отливке должна быть простейшей; место для их установки нужно выбирать так, чтобы в них возникали сжимающие усилия. Для уменьшения напряжений и скоплений металла при отливке ребер в стенке двух и более пересекающихся плоскостей рекомендуется во внутренних углах ребер предусматривать отверстия диаметром 30—50 мм (рис. 10-1, д). Прямоугольные и многоугольные отверстия в стенках отливки должны иметь хорошо скругленные углы и быть усилены бортами (рис. 10-1, е).

Большие плоские поверхности в конфигурации отливки нежелательны, особенно если при формовке они располагаются горизонтально в верхней части формы; наиболее удобными и дешевыми являются отливки, очерченные поверхностями вращения. Очертания поверхностей моделей должны быть такими, чтобы их можно было беспрепятственно извлекать из формы.

Важным фактором в применении литья для изготовления аппаратов является его себестоимость, которая определяется стоимостью материала, оснащенностью литейного хозяйства предприятия, способом литья, весом отливки, ее сложностью и числом изделий, выполненных (отлитых) по одной модели. Если принять за единицу себестоимость 1 т отливок из серого чугуна (например, С412-28), себестоимость отливок из других металлов составит [Л. 21]:

Серый чугун	1,0—1,2	Аустенитная сталь типа 18-8	3,1—4,0
Литая сталь	1,4—1,5	Алюминий и его сплавы	4,9—5,6
Ферросилид	2,5—2,7	Бронзы	6,0—9,0

Отливки равного веса, но различной конструктивной сложности могут отличаться по себестоимости в 2 раза и более. При увеличении веса отливки относительная себестоимость 1 т литья снижается. Стоимость моделей

составляет обычно 10—15% стоимости отливки. Себестоимость отливки существенно изменяется в зависимости от метода литья:

Литье в земляные формы	1
Корковое литье	2
Литье по выплавленным моделям	10

Последние два способа обеспечивают при своей дороговизне высокую степень чистоты поверхности отливок и точность их размеров. Поэтому при массовом производстве они становятся конкурентоспособными вследствие экономии на последующей механической обработке литья.

При конструировании литых деталей аппаратов следует иметь в виду, что вследствие расталкивания модели, смещения стержней, сотрясений грунта и других причин отливки никогда не получаются точно по чертежу. Допустимые отклонения в размерах отливок регламентированы ГОСТ 1855-55. В зависимости от назначения детали и последующей обработки следует предусматривать в отливке необходимые припуски. На чертежах обычно отмечают базовые поверхности, относительно которых обрабатывается и проверяется готовое изделие.

10-2. КОНСТРУИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АППАРАТОВ

В соответствии с категориями аппарата конструктор выбирает металл, назначает способ сварки, тип шва, технологию подготовки кромок и другие операции с таким расчетом, чтобы обеспечить прочность и плотность швов и стойкость аппарата против коррозии.

Наиболее распространенной в аппаратостроении является электродуговая автоматическая сварка под флюсом, а также полуавтоматическая и ручная электродуговая сварка. При сварке применяют соединения деталей встык, втавр, внахлестку и угловые. Подготовка кромок свариваемых элементов определяется их толщиной и методом сварки (рис. 10-2 и 10-3). Автоматической сваркой односторонним швом можно сваривать листы толщиной до 25 мм, двусторонним швом — до 50 мм. Зазор между листами *l* выбирают в зависимости от толщины листов *s*:

<i>s, мм</i>	до 8	10—12	14—18	20—30	30—40	40—50
<i>l, мм</i>	0—2	1—2	3—4	4—7	6—9	8—11

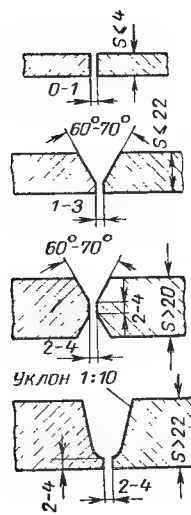


Рис. 10-2. Разделка кромок при ручной дуговой сварке в зависимости от толщины листов.

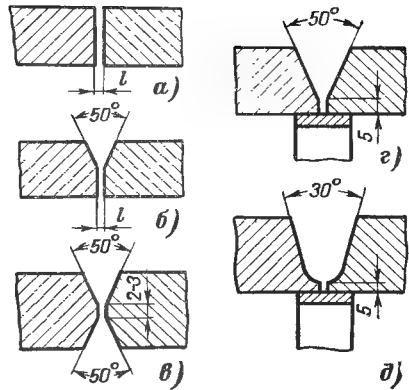


Рис. 10-3. Разделка кромок при автоматической сварке под флюсом.

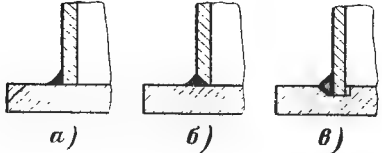


Рис. 10-4. Типы сварных швов об-с

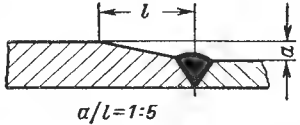


Рис. 10-5. Сварка листов разной толщины.

Бесскосная подготовка кромок допускается при сварке листов толщиной до 6—8 мм. Разделка кромок под углом способствует увеличению степени участия металла электрода (обычно более качественного) в формировании металла шва. Разделку швов по рис. 10-3, *г* и *д* применяют только для поперечных швов обечаек для сварки на подкладном листе и при одностороннем доступе к шву. Вариант шва рис. 10-3, *г* пригоден для листов толщиной до 18 мм. Сварка деталей втавр с бесскосными

кромками, например при соединении обечаек с трубными решетками (рис. 10-4, а), дает лучшие результаты, чем со скошенными (рис. 10-4, б). Проточку под обечайку (рис. 10-4, в) делать не рекомендуется. Листы разной толщины, предназначенные для стыковой сварки, необходимо предварительно подгонять по толщине, чтобы уклон скоса составлял 1:5 (рис. 10-5). Для предотвращения перегрева швов и повторного расплавления металла в них швы на свариваемой детали следует располагать на расстоянии не менее 40 мм. Не следует одним швом соединять более двух деталей. Продольные швы не должны прерываться отверстиями и штуцерами или перекрываться лапами и опорами. Все швы аппарата должны быть доступны для осмотра в условиях его эксплуатации. Не рекомендуется приваривать штуцеры, ребра, опоры и другие детали у самого края аппарата, так как возникающие при этом напряжения не смогут равномерно распределиться по сечению материала и смогут тем самым вызвать растрескивание шва и коробление края.

Сварка сопровождается термическими деформациями металла. Поэтому такие операции сборки, как развальцовка, чеканка и клепка, должны производиться после сварки. Прочность и плотность таких соединений не будет нарушена сваркой. Также после сварки должны производиться операции обработки резанием, обтачивание фланцев и т. п. Вследствие повышенной хрупкости металла сварных швов не рекомендуется проектировать их в зоне возникновения изгибающих напряжений.

Сварка элементов из низколегированных сталей должна выполняться при предварительном или сопутствующем подогреве, а сварные соединения должны подвергаться термической обработке, обычно высокому отпуску при 720—760° С.

10-3. ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ОБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК

Заготовкам, предназначенным для последующей механической обработки, нужно придавать форму, удобную для установки их на станки. Иногда в отливках предусматривают специальные выступы для укрепления их в станке.

Форму и размеры заготовок принимают такими, чтобы обрабатываемая поверхность резко отделялась от

необрабатываемой и была минимальной. Для этого все поверхности заготовок, подлежащие обработке, должны выступать над необрабатываемыми (рис. 10-6). Обрабатываемые плоскости желательно располагать параллельно или перпендикулярно одна к другой. Расположение обрабатываемых плоскостей под углом, отличным от 0, 30, 45, 60 и 90°, допускается только в случаях настоятельной необходимости (рис. 10-6). Выемки и пазы в деталях следует проектировать так, чтобы они получались путем обработки на токарном или карусельном станке или же обработкой фрезой на проход. Углубления выемок и пазов следует делать по возможности до одного уровня. Так, при выполнении поперечного паза в трубных решетках многоходовых теплообменников его глубину делают равной глубине проточки края решетки под прокладку (рис. 10-7).

Класс чистоты обработки поверхностей детали должен быть технически обоснованным. Не всегда следует назначать обработку поверхностей детали только для придания ей лучшего вида. Обработка деталей должна производиться преимущественно на станках; все виды ручной обработки — пригонка, шабровка, доводка — очень дороги и должны быть сведены к минимуму.

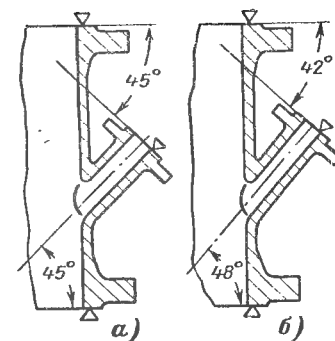


Рис. 10-6. Форма выступов и взаимное расположение обрабатываемых плоскостей.

а — правильно; б — неправильно.

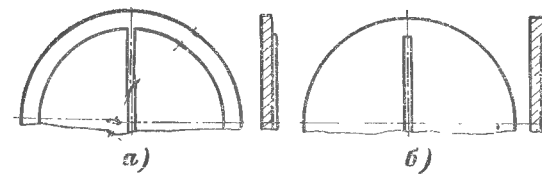


Рис. 10-7. Проточка края и паза под прокладку в трубной решетке.

а — правильно; б — неправильно.

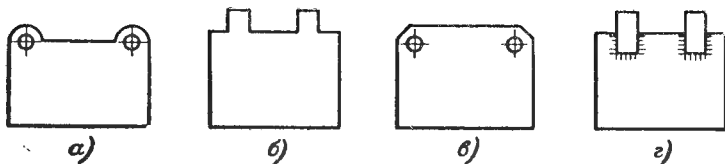


Рис. 10-8. Формы деталей, вырезаемых из листа.

а и б — неправильно; в и г — правильно.

Резка металла — одна из наиболее распространенных операций при изготовлении деталей теплообменных аппаратов. Для удобства изготовления и удешевления изделий деталям нужно придавать такую форму, чтобы их можно было разрезать ножницами при наименьшем количестве отходов. Сложные детали вырезают кислородным резаком. При проектировании нужно избегать внутренних углов и небольших выступов в деталях (рис. 10-8, а и б) и назначать прямые разрезы или предусматривать последующую приварку пластинок или проушин (рис. 10-8, в и г). Такая конструкция деталей позволяет упростить резку и снизить количество отходов.

Гибка листов вызывает в металле упругие и пластические деформации. Минимальный радиус гибки листа R определяется его толщиной s и коэффициентом k , зависящим от свойств материала и направления прокатки листа при его изготовлении (табл. 10-2):

$$R = ks. \quad (10-1)$$

Таблица 10-2

Значения коэффициента k при гибке листов

Материал листа	Значения k при гибке	
	поперек направления прокатки	вдоль направления прокатки
Стали 10, 15 и Ст.2	0,5	1,2
Латунь нагартованная	0,5	1,2
Мягкая латунь и алюминий	0,3	0,5
Медь	0,25	0,4

Согнутые листы рекомендуется подвергать термической обработке для снятия возникающего в металле на-

клепа. Минимальный радиусгиба металла без опасного наклепа $R_{\text{мин}} = 20s$. Поэтому принимают минимальный диаметр обечаек, свальцованных в холодном состоянии, $D \geq 40s$. Минимальный радиус гибки труб $R_{\text{мин}}$ из условий допустимого наклепа принимают:

$$R_{\text{мин}} = D \left(20 \frac{s}{D} + 0,5 \right). \quad (10-2)$$

10-4. ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Аппараты из сталей аустенитного класса

Особенность конструирования аппаратов из сталей аустенитного класса заключается в опасности перегрева металла при сварке и связанного с ним выгорания легирующих элементов, т. е. потери химической стойкости стали. Поэтому сварные соединения конструируют так, чтобы в месте сварки металл обоих элементов достигал точки плавления одновременно; сварка встык двух равностенных деталей с этой точки зрения происходит в идеальных условиях. При сварке деталей разной толщины для обеспечения равномерности прогрева нужно утонять кромку толстой детали до толщины тонкой. Для этого можно делать уклон на толстой детали (см. рис. 10-5) или выбирать канавки и проточки (рис. 10-9).

С точки зрения сохранения химического состава сталей очень важно не перекаливать несколько раз одно и то же место. Поэтому нельзя конструировать детали с близко расположенными сварными швами. Например, при соединении двух обечаек их продольные швы в месте стыка должны отстоять один от другого не менее чем на три толщины листа.

Известно, что коэффициент теплового расширения высоколегированных сталей примерно в 1,5 раза больше, а коэффициент теплопроводности в 3—4 раза меньше этих констант углеродистых сталей. При сварке деталей из легированных сталей прогрев металла вблизи шва получается небольшим, а тепловое расширение в шве — большим, в результате чего возникают высокие напряжения, которые могут привести к разрушению аппарата и к снижению коррозионной стойкости стали. Основным способом снижения остаточных напряжений в таких конструкциях является применение гибких промежуточных элементов, играющих роль компенсаторов (рис. 10-10).

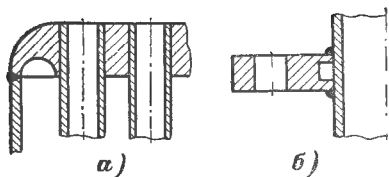


Рис. 10-9. Способы выравнивания толщины свариваемых деталей из высоколегированных сталей.

а — сварка обечайки с трубной решеткой; б — приварка фланца к обечайке.

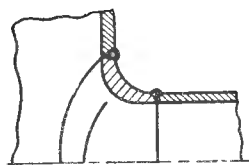


Рис. 10-10. Вварка гибкого компенсирующего элемента.

Сварка высоколегированных сталей с углеродистыми возможна потому, что температуры их плавления отличаются незначительно. Различия в химическом составе также не служат препятствием. Однако коррозионные свойства таких швов снижаются, так как концентрация легирующих элементов в металле шва ниже, чем в основном металле.

Аппараты из меди

Высокая теплопроводность, низкая окисляемость и хорошая обрабатываемость меди и сплавов на медной основе обеспечили широкое применение ее в пищевой, криогенной, кислородной и некоторых других отраслях промышленности.

Медь очень пластична. Из нее легко валыцевать обечайки, штамповать или выбивать крышки и выпуклые днища, вытягивать трубы и прутки. Для увеличения жесткости на тонкостенных медных обечайках выдавливают зиги, представляющие собой кольцевые выпуклости по окружности аппарата (рис. 10-11, а).

Жесткие соединения медных деталей осуществляют пайкой, сваркой и клепкой. Пайку мягкими припоями всегда производят внахлестку (рис. 10-11, б). Швы, паяные мягкими припоями, например ПОС-30 или ПОС-40, пригодны для работы при любых низких температурах и температурах до $+120^{\circ}\text{C}$. Предельно допустимое напряжение таких швов не более 25 кгс/см^2 . Повышения прочности швов в тонкостенных сосудах ($s \leq 2 \text{ мм}$) достигают применением замков или фальцев с последующим пропайванием шва (рис. 10-11, в). При сборке обечаек из

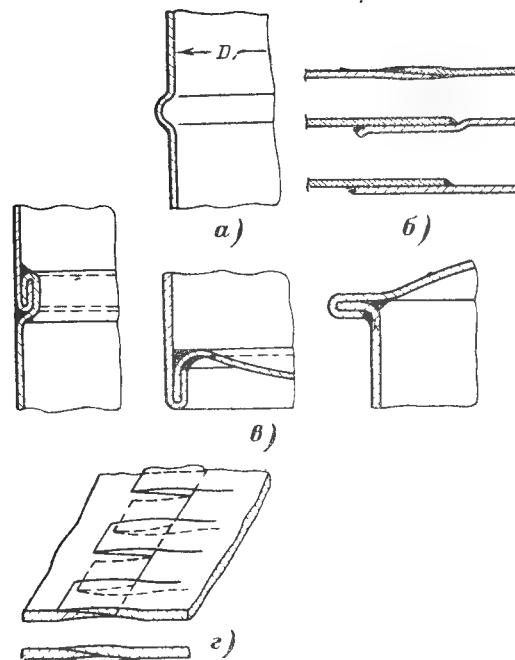


Рис. 10-11. Способы упрочнения деталей и узлов из меди.

а — зиг на медной обечайке; б — варианты паяных швов; в — виды фальцев; г — конструкция продольного шва с зубчатой кромкой.

тонких листов применяют соединения с зубчатой кромкой (рис. 10-11, г).

Крепление медных труб в медных и латунных трубных решетках производят, как правило, пайкой мягким припоем.

Для соединения медных деталей аппаратов, предназначенных для работы при значительных механических нагрузках, применяют твердые припои ПМЦ-47 и ПМЦ-52 или латунь Л62. В особо ответственных случаях применяют серебряные припои ПСр-10, ПСр-12, ПСр-25. Коэффициент прочности шва ϕ на твердых припоях следует принимать по нормам Госгортехнадзора равным 0,8. Пайкой можно соединять детали из различных металлов: меди и латуни, меди и стали, латуни и стали и т. д., если

припой смачивает поверхность соединяемых деталей.

При изготовлении медной аппаратуры до настоящего времени широко применяют заклепочные соединения. В отличие от пайки твердыми припоями заклепочные соединения, выполняемые холодными медными заклепками, не дают коробления. Подробно заклепочные швы рассматриваются в специальной литературе. Разъемные соединения медных аппаратов не могут быть выполнены также медными вследствие пластичности меди. Поэтому все фланцы медных аппаратов делают из стали, выполняя их свободными на отбортовке или на бортовом кольце, припаянном к обечайке твердым припоем. Многие узлы медной аппаратуры имеют также специфические конструктивные особенности [Л. 21].

Аппараты из сплавов алюминия

Алюминий легко окисляется, что практически исключает возможность пайки при сборке частей из алюминия. Основными видами соединения частей алюминиевых аппаратов являются клепка и сварка.

Вследствие низкой температуры плавления алюминия (657°C) и малой вязкости расплава необходимо строго выдерживать одновременное расплавление обеих кромок свариваемых деталей. Поэтому в месте сварки соединяемые части должны иметь совершенно одинаковую толщину, причем наиболее удобен стыковой шов. Чтобы обеспечить стыковой шов, все патрубки следует приваривать только к отбортовке корпуса. Фланцы любого диаметра выполняют из стали свободно посаженными на отбортовке. Опоры на аппарате изготовлять из алюминия нежелательно; обычно стальные лапы и опоры привариваются к стальному разъемному кольцу, которое болтами обжимают вокруг аппарата.

Особенности конструирования эмалированных аппаратов

Высокая стойкость эмали против действия агрессивных сред способствует применению эмалированной аппаратуры в производствах, требующих высокой чистоты продукта. Эмалированные аппараты изготовляют из высокопрочных чугунов и малоуглеродистых сталей; металл должен отличаться низким коэффициентом тепло-

вого расширения, близким к коэффициенту расширения эмали.

Для получения покрытия высокого качества аппарату должна быть придана простая форма с плавными очертаниями. Очень важен равномерный прогрев всех деталей при обжиге эмали, поэтому аппараты нужно конструировать по возможности равностенными. Очень неблагоприятны для эмалирования крупные детали, ограниченные плоскими поверхностями, так как при обжиге они склонны к короблению, в результате чего эмаль может растрескиваться. Наиболее частой причиной брака эмалированной аппаратуры при ее изготовлении является появление пузырей. Главная причина их появления в эмали — выделение газов из сварных швов при обжиге.

В процессе монтажа и разборки эмалированных аппаратов следует избегать местных перенапряжений и ударов, имея в виду хрупкость эмали. Фланцевые соединения эмалированных аппаратов выполняют фигурными, с волнообразной торцевой поверхностью фланца вокруг болтовых отверстий, приближая этим толстые фланцы к условиям равенства. Толщину прокладок выбирают в 3—4 раза больше обычной, добиваясь этим повышения эластичности прокладки и как следствие снижения посадочного давления, необходимого болтового усилия и изгибающих моментов.

Конструирование деталей из прессматериалов

В последние годы для нужд химической промышленности начали изготовлять аппараты из листовых пластических и прессматериалов.

Изготовление аппаратов из листов несложно. Из терморезистивных материалов, например фаолита, изделия формуют из мягких листов, отверждая их затем термической обработкой при $100\text{—}160^{\circ}\text{C}$. Изделия из термопластических материалов, например винипласта, формуют также из листов, нагретых предварительно до температуры размягчения ($80\text{—}100^{\circ}\text{C}$), затем склеивают или сваривают. При необходимости изделия подвергают холодной обработке. Конфигурация аппаратов, изготовляемых из листов, не имеет ограничений.

Проектирование и технология изготовления деталей из прессматериалов прессованием значительно сложнее

и имеет специфические особенности. При конструировании таких деталей необходимо предусмотреть: а) минимальный расход материала; б) хорошую заполняемость формы; в) легкость извлечения деталей из матрицы и пуансона; г) минимальный объем работ по механической обработке и доводке деталей после прессования.

Брак прессованных изделий является обычно следствием плохого заполнения формы, недопрессовки, образования трещин и коробления изделий в результате выбора неудачных очертаний и неравномерного отвердевания.

Толщину стенок прессованных деталей принимают не менее 1 мм из условия обеспечения заполнения формы, и не более 10—12 мм из условия обеспечения полного и равномерного отвердевания материала. В толстых стенках и местах скопления прессмассы она может полностью не затвердеть даже при длительном выдерживании в прессе. Рекомендуется проектировать изделия по возможности равностенными. Сопряжение стенок детали из прессмасс должно быть плавным, острые углы нежелательны. Для снижения напряжений изгиба в углах допускается делать плавные утолщения. Для увеличения прочности и уменьшения веса в изделиях рекомендуется предусматривать тонкие стенки, усиленные ребрами. Для облегчения удаления изделия из формы и пуансона вертикальные стенки следует проектировать с уклоном в направлении прессования. Отверстия в пресспорошковых деталях можно: формовать при прессовании полностью; формовать частично и затем продавливать или просверливать до конца; сверлить после прессования.

Резьба в изделиях из пластических масс в отверстиях диаметром более 5 мм образуется прессованием. Если в отверстие с резьбой часто ввинчивается металлический винт, в пластмассу нужно запрессовать металлическую резьбовую втулку. В местах соприкосновения матрицы с пуансоном и с выталкивателем, а также по линии разъема формы образуется заусенец (грат). При конструировании следует расположить грат так, чтобы его было легко удалять. В зависимости от его расположения грат удаляют наждачным кругом или на токарном станке.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите области применения и особенности конструирования литой аппаратуры.
2. Назовите особенности конструирования сварной аппаратуры.

3. Какое значение для конструирования деталей аппаратов имеют механическая обработка, резка и гибка металла?

4. Особенности конструирования деталей из легированных сталей.

5. Особенности конструирования деталей из меди и алюминия.

6. Особенности конструирования эмалированных аппаратов.

7. Особенности конструирования деталей из прессматериалов.

Глава одиннадцатая

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ НА ПРОЧНОСТЬ

11-1. ВЫБОР МЕТОДА РАСЧЕТА И КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ

Теплообменные аппараты должны выдерживать напряжения, возникающие в его стенках и в отдельных элементах от давления теплоносителей или окружающей среды, от собственного веса, веса находящихся в нем веществ, а также от термических деформаций. При проектировании аппаратов подбирают конструкционные материалы, а затем расчетом на прочность определяют размеры частей и деталей, которые могут обеспечить прочность их при работе аппарата и при пробных испытаниях (см. гл. 13). Существуют два метода расчета на прочность: по предельным напряжениям и по предельным нагрузкам. В первом методе пределом несущей способности конструкции принимают достижение любым сечением какой-либо ее детали предела текучести, т. е. начала пластической деформации. В расчете по предельным нагрузкам за опасное принимают напряжение, вызывающее общую пластическую деформацию всего нагруженного узла. Величина максимально допускаемой силы при расчете по предельным нагрузкам всегда больше таковой при расчете по предельным напряжениям.

Метод расчета по предельным нагрузкам применим для пластических материалов, малоуглеродистых сталей, меди и ее сплавов, алюминия и т. п., из которых изготовляют большинство теплообменных аппаратов. Этот метод позволяет точнее учитывать несущую способность конструкции и способствует уменьшению расхода конструкционных материалов. Однако метод совершенно не-

Таблица 11-1

Номинальные допускаемые напряжения $\sigma_{\text{доп}}^*$, кгс/мм²

а) Углеродистые и марганцовистые стали

Температура стенки, °C	Марка стали									
	Ст. 2	10	Ст. 3	20 20К	25	22К	16ГС (3Н)	09Г2С (М)	10Г2С1 (МК)	15ГС
20	13,0	13,0	14,0	14,7	16,5	17,0	17,0	17,0	17,7	18,5
250	10,9	11,2	12,0	13,2	14,7	15,0	14,5	14,5	16,4	16,5
275	10,3	10,6	11,4	12,6	14,0	14,6	14,0	14,0	16,0	16,1
300	9,8	10,0	10,8	11,9	13,2	14,0	13,4	13,4	15,3	15,3
320	—	9,5	—	11,4	12,5	13,6	13,0	13,0	14,8	14,5
340	—	9,0	—	10,9	11,9	13,0	12,5	12,5	14,1	13,7
360	—	8,5	—	10,3	11,2	—	12,0	12,0	13,5	12,9
380	—	8,1	—	9,7	10,6	—	11,5	11,5	12,8	12,1
400	—	7,7	—	9,2	10,0	—	11,0	11,0	12,0	11,3
420	—	7,2	—	8,6	9,3	—	—	—	—	10,2
440	—	6,0	—	7,3	7,7	—	—	—	—	9,0
460	—	4,7	—	5,6	5,9	—	—	—	—	—
480	—	3,7	—	4,3	4,5	—	—	—	—	—
500	—	3,0	—	3,4	3,4	—	—	—	—	—

б) Теплоустойчивые и жаропрочные легированные стали

Температура стенки, °C	Марки стали			
	15ХМ	12Х1МФ	1Х12В2МФ (ЭИ756)	Х18Н10Т Х18Н12Т Х14Н14В2М (ЭИ257) Х18Н9Т
20	15,3	17,3	20,0	14,6
250	15,2	16,6	—	12,5
300	14,7	15,9	—	12,0
350	14,2	15,2	—	11,6
400	13,7	14,5	—	11,1
420	13,5	14,1	—	11,0
440	13,2	13,9	—	10,8
460	13,0	13,6	—	10,6
480	12,6	13,3	—	10,5
500	10,3	12,6	—	10,4

Примечания: 1. Указанные в таблице значения номинальных допускаемых напряжений действительны при условии, что сталь подвергалась термической обработке, установленной стандартными или техническими условиями, указанными в «Правилах» по паровым котлам, и что получаемые в результате термической обработки свойства стали сохраняются после всех технологических операций при изготовлении и монтаже элементов оборудования. Приведенные в таблице значения $\sigma_{\text{доп}}^*$ являются минимальными значениями.

Продолжение табл. 11-1

ценными из вычисленных по трем следующим условиям:

$$\sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{Т}}^f}{1,5}; \quad \sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{В}}^f}{2,6}; \quad \sigma_{\text{доп}}^* \leq \frac{\sigma_{\text{д.п}}^f}{1,5},$$

в которых характеристики прочности стали приняты по ГОСТ 10802-64, а для сталей, не вошедших в упомянутый ГОСТ, — по минимальным значениям $\sigma_{\text{Т}}^f$

и $\sigma_{\text{В}}^f$ в среднем (с отклонениями $\pm 20\%$) значениям $\sigma_{\text{д.п}}^f$, полученным из опытных данных.

2. Для промежуточных значений температуры стенки величина допускаемого напряжения определяется путем интерполяции двух ближайших значений, имеющихся в таблице, с округлением результата до 0,05 кгс/мм² в сторону меньшей величины.

3. При значениях допускаемых напряжений, заключенных в скобки, выбор толщины стенки следует производить с учетом потери на окалинообразование.

4. Применение сталей при температуре стенки на расчетных (длительных) режимах, превышающей установленную «Правилами» по котлам, должно быть в каждом конкретном случае согласовано заводом-изготовителем с республиканским органом Госгортехнадзора.

5. При температуре стенки выше 540°С указанные в таблице значения допускаемых напряжений для аустенитных сталей применимы при величине зерна в пределах 3—7 баллов по шкале ГОСТ.

В формулах принято:

$\sigma_{\text{Т}}^f$ — условный предел текучести при растяжении при расчетной температуре, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{В}}^f$ — предел прочности при растяжении при расчетной температуре, кгс/мм²;

$\sigma_{\text{д.п}}^f$ — условный предел длительной прочности при растяжении (через д.п. 100 000 ч) при расчетной температуре, кгс/мм².

применим для расчета деталей из хрупких материалов (закаленные стали, серые чугуны, антихлор и др.), разрушение которых наступает без заметной пластической деформации. Такие детали рассчитывают по методу предельных напряжений.

Если опасны потеря устойчивости аппарата или сильное искажение формы, то за предельную величину напряжения, по которой выбирают допускаемое напряжение, принимают предел текучести; если опасно только разрушение, то за предельную величину напряжения принимают предел прочности.

При определении допускаемых напряжений в сосудах, работающих под давлением, пользуются коэффициентом запаса прочности, выбор которого должен производиться с учетом надежности работы сосуда и экономии металла. В табл. 11-1 приведены номинальные допускаемые напряжения для наиболее распространенных конструктивных сталей в зависимости от температуры стенки сосуда и предела прочности $\sigma_{\text{В}}$. В табл. 11-2 приведены допускаемые напряжения для некоторых цветных металлов в зависимости от температуры стенки.

Таблица 11-2

Допускаемые напряжения и растяжение для некоторых цветных металлов и сплавов в зависимости от температуры стенки

Медь прокатанная отожженная		Латуни марок Л68, Л62 и ЛС59-1 прокатанные и отожженные		Мягкий алюминий	
Температура стенки, °С	Допус- каемые напряже- ния, кгс/мм²	Температура стенки, °С	Допус- каемые напряже- ния, кгс/мм²	Температура стенки, °С	Допус- каемые напряже- ния, кгс/мм²
До 120	4,4	До 120	5,0	До 30	1,5
121—140	4,2	121—140	4,75	31—60	1,4
141—160	4,0	141—160	4,50	61—80	1,3
161—180	3,8	161—180	4,25	81—100	1,2
181—200	3,6	181—200	4,00	101—120	1,05
201—230	3,2	201—220	3,75	121—140	0,9
231—250	3,0	221—240	3,50	141—160	0,75
		241—250	3,25	161—180	0,6
				181—200	0,45

Таблица 11-3

Категории сосудов по допускаемым давлениям среды и температурам стенки и значения коэффициентов запаса прочности для них

Категория сосудов	Допуска- емое давление (избыточ- ное), кгс/см²	Темпера- тура стенки, °С	Допускаемые к применению стали	Запас прочности	
				по преде- лу проч- ности n_p	по преде- лу теку- чести n_t
I II III	До 850	До 750 До 550 До 475	Легированные	—	1,4—2,0
IV	До 50	До 350	Легированные и каче- ственные углероди- стые		
V	До 16	До 200	Качественные углеро- дистые и углероди- стые обыкновенно- го качества Углеродистые обык- новенного качества	4—4,25 3,5—4	1,7—1,8 —

Примечание. Указанные в таблице коэффициенты запаса прочности должны быть увеличены:
на 50%, если давление и температура в сосуде могут повыситься в результате химической реакции;
на 15% при расчете сосудов с огневом обогревом;
на 15% при расчете кованых сосудов с фланцами;
на 50% при расчете литых стальных сосудов.

При расчете стальных теплообменных аппаратов для химической промышленности коэффициенты запаса прочности принимают обычно по данным табл. 11-3.

11-2. РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ НА ПРОЧНОСТЬ [л. 94]

Методика расчета на прочность тонкостенных и толстостенных сосудов различна. Тонкостенными принято считать сосуды с отношением наружного диаметра к внутреннему меньше или равным 1,2.

В тонкостенном сосуде с внутренним давлением p сила, разрывающая стенку вдоль оси аппарата (рис. 11-1, а), равна:

$$pD_{\text{вн}}l, \text{ кг},$$

а тангенциальная сила в стенке сосуда составляет величину

$$2\delta l\sigma_t,$$

где p — внутреннее избыточное давление в сосуде, кгс/см²; $D_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр сосуда, мм; l — длина сосуда, мм; δ — толщина стенки, мм; σ_t — тангенциальное нормальное напряжение в стенке, кгс/мм².

В сосуде, рассчитанном на давление p , эти силы равны, откуда можно найти, что

$$\sigma_t = \frac{pD_{\text{вн}}}{2\delta}. \quad (11-1)$$

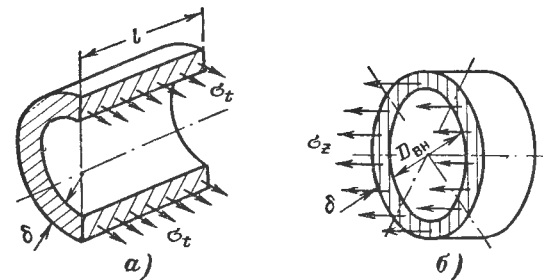


Рис. 11-1. К определению средних напряжений.

а — тангенциального; б — осевого.

Растягивающая сила по оси сосуда под действием давления на днища равна:

$$p \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4}.$$

Эта сила уравнивается напряжениями в поперечном сечении сосуда (рис. 11-1, б). В тонкостенном сосуде можно принять, что средний диаметр равен внутреннему, и тогда уравнивающая сила будет равна:

$$\sigma_z \pi D_{\text{вн}} \delta.$$

Следовательно,

$$\sigma_z = \frac{p D_{\text{вн}}}{4 \delta}. \quad (11-2)$$

Из соотношений (11-1) и (11-2) видно, что тангенциальные напряжения в тонкостенном сосуде в 2 раза больше осевых.

Вертикальные тонкостенные сосуды с внутренним давлением, нагруженные технологическими материалами и теплоносителями весом G , должны быть проверены на разрыв в поперечном сечении. На основании уравнения равновесия

$$G + \frac{p \pi D_{\text{вн}}^2}{4} = \pi D_{\text{вн}} \delta \sigma_{\text{доп}},$$

откуда

$$\delta = \frac{p D_{\text{вн}}}{4 \sigma_{\text{доп}}} + \frac{G}{\pi D_{\text{вн}} \sigma_{\text{доп}}}, \quad (11-3)$$

или

$$\sigma_{\text{доп}} \geq \frac{p D_{\text{вн}}}{4 \delta} + \frac{G}{\pi D_{\text{вн}} \delta}.$$

Величину допускаемого напряжения определяют из соотношения

$$\sigma_{\text{доп}} = \eta \sigma_{\text{доп}}^*,$$

где $\sigma_{\text{доп}}^*$ — номинальное допустимое напряжение, кгс/мм², выбираемое по данным табл. 11-1 или 11-2; η — коэффициент, учитывающий класс аппарата, выбираемый по данным табл. 11-4.

По нормативным руководящим материалам для расчета сосудов, работающих под давлением [Л. 94], тол-

Рекомендуемые величины поправочного коэффициента η

Элементы	Величина коэффициента η
Сосуды бесшовные или сварные без отверстий или с отверстиями для приварки штуцеров:	
а) не обогреваемые горячими топочными газами	1,0
б) обогреваемые	0,9
Те же сосуды, но с отверстиями под развальцовку труб:	
а) необогреваемые	0,95
б) обогреваемые	0,85
Трубы поверхностей нагрева	1,0
Трубопроводы	0,85
Днища выпуклые:	
а) глухие	1,0
б) с лазами или другими неукрепленными отверстиями	0,95
Донышки плоские приварные	0,8

щину стенки тонкостенного аппарата, работающего под внутренним давлением, определяют по формуле

$$\delta = \frac{p D_{\text{вн}}}{200 \sigma_{\text{доп}} \varphi - p} + C, \text{ мм.} \quad (11-4)$$

Здесь, кроме принятых ранее обозначений:

p — рабочее избыточное давление в аппарате, кгс/см²; φ — коэффициент прочности сварного шва; $\varphi=1$ при сварке встык и втавр швов с двусторонним проваром, выполненных автоматической дуговой электросваркой флюсом; $\varphi=0,95$ при сварке встык и втавр швов с двусторонним сплошным проваром, выполненных вручную; $\varphi=0,9$ при сварке вручную швов, доступных с одной стороны и имеющих подкладку по всей длине шва; $\varphi=0,8$ при сварке встык и втавр швов без гарантированного сплошного провара, а также при соединении внахлестку со швами с двух сторон.

Для обечаек, ослабленных отверстиями одного и того же диаметра, расположенных вдоль оси обечайки, коэффициент прочности шва принимают равным:

$$\varphi = \frac{t-d}{t},$$

где d и t — диаметр отверстий и шаг между ними, см;
 C — поправка на коррозию и на отклонение от номинальной толщины листа; для сосудов, изготовленных из труб, $C \geq 0,5$ мм; для корпусов, изготовленных из листов толщиной $\delta \leq 20$ мм, $C = 1$ мм; для аппаратов, предназначенных работать в агрессивной среде, принимают $C = 2-6$ мм, а более точно ее определяют на основании скорости проникновения коррозии [Л. 21].

Величина пробного давления при гидравлическом испытании сосудов не должна превосходить вычисленную по одной из следующих формул:

$$p_r \leq \frac{240(\delta - C)\varphi\sigma_{\text{доп}}^{20}}{D_n - (\delta - C)} \text{ при } \frac{\delta - C}{D_n} \leq 0,13; \tag{11-5a}$$

$$p_r \leq \frac{315(\delta - C)[D_n - (\delta - C)]\varphi\sigma_{\text{доп}}^{20}}{D_n} \text{ при } \frac{\delta - C}{D_n} > 0,13, \tag{11-5б}$$

где $\sigma_{\text{доп}}^{20}$ — допускаемое напряжение при 20° С (по данным табл. 11-1).

Толщину стенки сосудов δ , подверженных наружному давлению, рассчитывают по формуле

$$\delta = 0,47 \frac{D_{\text{вн}}}{100} \left(\frac{p}{10^6 E^t} \frac{l}{D_{\text{вн}}} \right)^{0,4} + C, \tag{11-6}$$

где l — расчетная длина обечайки, равная длине кожуха плюс переходная цилиндрическая длина крышки аппарата, мм; E^t — модуль упругости первого рода при расчетной температуре, кгс/см², который выбирают по данным табл. 11-5.

В толстостенных сосудах, изготовленных из пластичного материала, при возрастании внутреннего давления в пластическое состояние переходит в первую очередь металл на внутренней поверхности. Далее по мере нагружения в пластическое состояние переходят последующие слои металла. В ходе пластического течения относительные деформации на наружной поверхности постепенно становятся больше деформации внутренних слоев, и разрушение начинается по наружной поверхности. Переход в пластическое состояние металла внутренних слоев сосуда при сохранении упругости наружных слоев не представляет опасности. Опасен случай, когда

Таблица 11-5

Модули упругости первого рода для сталей, кгс/мм²

Температура, °С	Марки стали							
	05*	20*	25*	30*	16М*	12МХ*	15ХМ*	X18H9T**
20	20 500	20 200	20 200	20 400	—	21 050	20 850	20 200
100	19 600	18 700	20 000	20 000	—	—	—	19 800
200	18 800	17 900	19 500	19 500	—	—	—	19 300
300	17 500	17 500	18 900	18 900	—	—	19 900	18 500
400	16 100	16 100	16 700	16 700	18 900	—	19 000	17 700
450	15 700	13 700	12 200	15 200	—	17 370	17 160	—
500	—	—	—	—	16 800	—	—	16 900
600	—	—	—	—	—	—	15 600	16 000
700	—	—	—	—	—	—	—	15 000

* После нормализации.
 ** После закалки и старения.

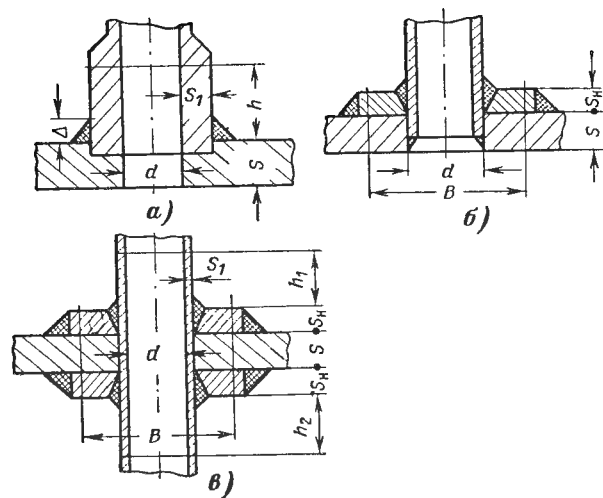


Рис. 11-2. Варианты укрепления отверстия.

a — с помощью штуцера: $h \leq 2,5s_1$; $h \leq 2,5s$; *б* — с помощью накладки: $B \leq 2d$; *в* — с помощью штуцера и накладки: $B \leq 2d$; $h_1 + s_{H1} \leq 2,5s$, $h_1 + s_{H1} \leq 2,5s_1$, $h_2 + s \leq 2,5s$, $h_2 + s_{H2} \leq 2,5s_1$.

все сечения переходят в пластическое состояние, называемое предельным. При достижении предельного состояния тангенциальные напряжения σ_t выравниваются по толщине стенки сосуда.

Для расчета толстостенных сосудов можно пользоваться формулой

$$\delta = \frac{pD_{\text{вн}}}{230 \sigma_{\text{доп}} - p} + C, \text{ см.} \quad (11-7)$$

Формула (11-7) пригодна для расчета толстостенных сосудов, толщина стенки которых не превышает величину, определяемую отношением $D_{\text{нар}}/D_{\text{вн}} \geq 1,5$, где $D_{\text{нар}}$ и $D_{\text{вн}}$ соответственно наружный и внутренний диаметры сосуда.

Отверстия, высверливаемые или вырезаемые в корпусе сосуда под штуцеры, смотровые люки, лазы и т. п., ослабляют прочность аппарата. По «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность», утвержденным Госгортехнадзором РСФСР в 1965 г., наибольший диаметр отверстий, которые можно проектировать в сосудах

без специальных укреплений, определяют по одной из следующих формул:

при $\varphi_0 > 0,5$

$$d_{\text{пред}} = 1,2 \left(\frac{4}{3\varphi_0} - 1 \right) \sqrt{(D_{\text{вн}} + \delta)(\delta - C)}; \quad (11-8a)$$

при $\varphi_0 \leq 0,5$

$$d_{\text{пред}} = 2 \left(\frac{1}{\varphi_0} - 1 \right) \sqrt{(D_{\text{вн}} + \delta)(\delta - C)}, \quad (11-8б)$$

где

$$\varphi_0 = \frac{p[D_{\text{вн}} + (\delta - C)]}{200(\delta - C)\sigma_{\text{доп}}}.$$

В теплообменных аппаратах нефтеперерабатывающей промышленности принято укреплять отверстия, если внутренний диаметр патрубка превышает 50 мм. Укрепления достигают или усиленным штуцером или накладками. Укрепляющие накладки могут быть внешними и внутренними (рис. 11-2). Диаметр накладки B не должен превышать двух диаметров отверстия, так как на большем расстоянии концентрация напряжений резко снижается и укрепляющее действие накладки становится ненужным.

11-3. РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ КРЫШЕК И ДНИЩ

Форма крышек и днищ в теплообменных аппаратах бывает различной: сферической, эллиптической, конической или плоской. При прочих равных условиях наименьшую расчетную толщину имеют сферические (полусферические) днища (рис. 11-3, а). Но они трудно штампуются целиком и поэтому их чаще изготавливают путем сварки штампованных сферических сегментов и секторов. Высокая стоимость изготовления ограничивает их применение.

Приводимая ниже расчетная формула (11-9) для определения толщины стенки днища дает значение δ сферической крышки, которое меньше толщины стенки цилиндрической обечайки на то же рабочее давление. Однако с учетом ослаблений для штуцеров и лазов и технологии стыкования с кожухом толщину стенки сферических крышек выбирают обычно равной толщине стенки цилиндрической обечайки или превышающей ее.

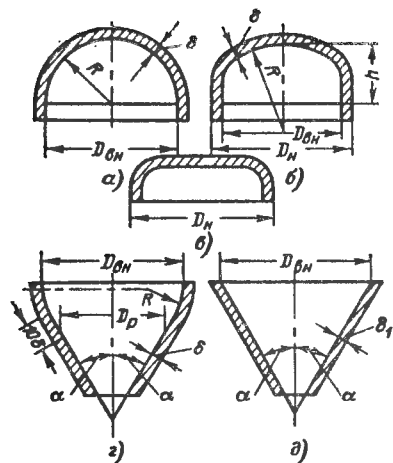


Рис. 11-3. Формы крышек и дна для теплообменных аппаратов.

а — сферическое; б — эллиптическое;
в — корытовое; г — коническое отбортованное;
д — коническое неотбортованное.

формы, глухого или имеющего неукрепленное отверстие, должна быть не менее определенной по формуле

$$\delta = \frac{p D_{\text{вн}}}{400 Z \sigma_{\text{доп}} - p} \frac{D_{\text{вн}}}{2h} + C, \text{ см}, \quad (11-9)$$

где $h \geq 0,2 D_{\text{вн}}$ — высота выпуклой части дна, см;

$$Z = 1 \text{ при } \frac{d}{\sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)}} \leq 0,4;$$

$$Z = \frac{2}{1,25 \frac{d}{\sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)}} + 1,5} \text{ при } 0,4 \leq \frac{d}{\sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)}} \leq 2;$$

$$Z = \frac{2}{\frac{d}{\sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)}} + 2} \text{ при } \frac{d}{\sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)}} \geq 2.$$

Для глухих дна, а также дна с полностью укрепленным отверстием, принимают $Z=1$; здесь d — диаметр

Самыми распространенными являются эллиптически е дна (рис. 11-3, б) с отбортовкой. Наиболее выгодны по прочности дна, форма сечения которых образуется половиной эллипса с большой осью, равной диаметру сосуда D , и с малой осью, равной $2h$, где h — высота выпуклой части дна. Изготовление ранее применявшихся ранее коробовых дна (рис. 11-3, в) запрещено ГОСТ 6533-53.

Номинальная толщина стенки выпуклого дна эллиптической или сферической

(в свету) наибольшего отверстия в дна, мм. Для отверстий овальной формы за величину d принимают размер по наибольшей оси;

p , $D_{\text{вн}}$, $\sigma_{\text{доп}}$, C имеют прежние значения.

При $h > 0,3 D_{\text{вн}}$ напряжение в дна меньше, чем в цилиндрической части сосуда. Поэтому в таких днах часто проектируют лапы и лазы. Дна с укрепленными отверстиями рассчитывают как глухие. Отштампованные борта лазового отверстия укрепления не считаются. При наличии в дна двух и более отверстий мостик между ними должен быть не менее диаметра меньшего отверстия.

Стальные литые выпуклые дна рассчитывают по формуле для эллиптических дна, но допускаемые напряжения выбирают в 1,4 раза меньше, чем для штампованных дна.

Наибольший допускаемый диаметр неукрепленного отверстия в выпуклом дна $d_{\text{пред}}$ определяют в зависимости от коэффициента Z_0 по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} d_{\text{пред}} &= 0,4 \sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } Z_0 = 1; \\ d_{\text{пред}} &= 1,2 \left(\frac{4}{3Z_0} - 1 \right) \sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } 0,5 \leq \\ &\leq Z_0 \leq 1,0; \\ d_{\text{пред}} &= 2 \left(\frac{1}{Z_0} - 1 \right) \sqrt{D_{\text{вн}}(\delta - C)} \text{ при } Z_0 \leq 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (11-10)$$

Коэффициент Z_0 определяют по формуле

$$Z_0 = \frac{p \left[D_{\text{вн}} + \frac{2h}{D_{\text{вн}}}(\delta - C) \right]}{400 \frac{2h}{D_{\text{вн}}}(\delta - C) \sigma_{\text{доп}}}.$$

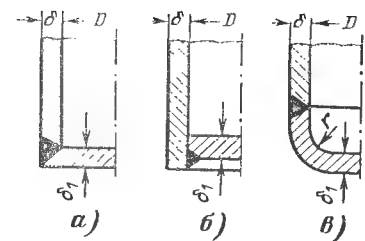


Рис. 11-4. Способы приварки плоских крышек и дна к корпусу аппарата и значения коэффициента K для них.

а — $K=0,75$; б — $K=0,5$; в — $r=2,53$;
 $\delta \leq \delta_н$; $K=0,85$.

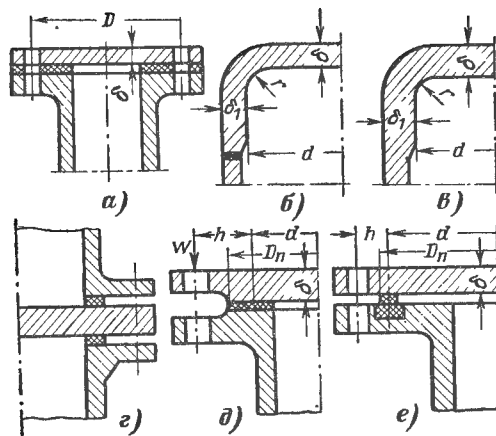


Рис. 11-5. Способы соединения плоских днищ с корпусом аппарата.

a — на болтах при сплошной прокладке; *б* — приварное; *в* — выполненное заодно с обечайкой; *г* — днище-заглушка, зажатая между фланцами; *д* — на болтах с прокладкой до болтов; *е* — на болтах с узкой жесткой прокладкой.

В аппаратах, предназначенных для работы с суспензиями и вязкими жидкостями, остатки которых необходимо удалить из сосуда, применяют конические днища (рис. 11-3, *з, д*).

Приближенно толщину стенки конического днища можно определить по формуле

$$\delta = \frac{p D_{\text{вн}}}{200 (\sigma_{\text{доп}} \varphi - p) \cos \alpha} + C, \text{ мм}, \quad (11-11)$$

где α — половина угла раствора конического днища, град; p , $D_{\text{вн}}$, σ , φ , C имеют те же значения, что и в формуле (11-4).

Более точные расчеты приведены в [Л. 21].

Расчет толщины плоского приварного доннышка (рис. 11-4) без центрального отверстия или с отверстием размером до $0,6 D_{\text{вн}}$ производят по формуле

$$\delta_1 = \frac{0,93 \delta}{1 - 0,43 \frac{d}{D_{\text{вн}}}} \sqrt{\frac{0,19 p}{\sigma_{\text{доп}} \cdot 100} \left(\frac{D_{\text{вн}}}{\delta} \right)^2 - 1} + C, \text{ мм}, \quad (11-12)$$

где δ — толщина стенки обечайки, мм; d — диаметр центрального расположенного отверстия в доннышке, мм; остальные обозначения те же, что и для эллиптических днищ.

Толщину плоских днищ, конструкции которых показаны на рис. 11-5, можно приближенно рассчитать по формуле (точный расчет см. [Л. 21])

$$\delta = D \sqrt{\frac{K p}{100 \sigma_{\text{доп}}}} + C, \text{ мм}, \quad (11-13)$$

где D — расчетный диаметр днища, мм; K — коэффициент, характеризующий конструкцию днища.

Коэффициент K принимают:

Для плоских доннышек, прикрепляемых к сосуду на резьбе	0,75
Для плоских сварных и приварных доннышек (см. рис. 11-4)	0,5
Для плоских штампованных приварных доннышек с отбортовкой с радиусом кривизны между стенкой и плоскостью не менее трех толщин доннышка (рис. 11-5, <i>б</i>) . .	0,25
Для заглушек, жестко зажатых между двумя фланцами (рис. 11-5, <i>г</i>)	0,19
Для плоских крышек (рис. 11-5, <i>а</i>)	0,16

Доннышки и корпус сосуда рекомендуется изготавливать из стали одной марки. Если стали различны, в расчет вводят напряжение, допускаемое для менее прочной стали.

11-4. РАСЧЕТ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Фланцевые соединения теплообменных аппаратов должны обеспечивать плотность и прочность сопрягаемых частей, удобство и быстроту сборки и разборки и быть простыми и дешевыми в изготовлении. Для создания плотности соединения между фланцами закладывают прокладки из паранита, асбеста, пенки, картона, резины и т. п. При затягивании болтов плоская прокладка сжимается, заполняя мельчайшие неровности на поверхностях соединяемых деталей, и создает необходимую плотность соединения.

Целью расчета фланцевых соединений является определение усилий затягивания болтов и размеров болтов, прокладок и фланцев.

Усилие, необходимое для первоначального сжатия прокладки при затяжке $P'_{пр}$, определяют по формуле

$$P'_{пр} = \pi b D q_0, \quad (11-14a)$$

где b — эффективная ширина прокладки, $см$; D — средний диаметр кольца прокладки, $см$; q_0 — удельное давление на рабочую поверхность прокладки, $кгс/см^2$.

В рабочем состоянии прокладки затянуты неравномерно по сечению и по окружности фланца. Принято брать некоторую эффективную ширину b , равную:

$$b = b_0 \text{ при } b_0 \leq 10 \text{ мм};$$

$$b = \sqrt{b_0} \text{ при } b_0 > 10 \text{ мм},$$

где b_0 — действительная ширина прокладки, $мм$.

Удельное давление q_0 зависит от толщины, формы и материала прокладки. Для паранитовых и асбестовых прокладок значение q_0 в зависимости от толщины прокладки s выражается следующими величинами:

$s, \text{ мм}$	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8
$q_0, \text{ кгс/см}^2$	400	200	160	130	120	110	105

Чем меньше толщина прокладки (при хорошо обработанных фланцах), тем надежнее плотность соединения. В теплообменных аппаратах ставят паранитовые прокладки толщиной 1,5—2,5 $мм$.

Плотность во фланце при рабочем давлении в сосуде обеспечивается при приложении усилия

$$P''_{пр} = \pi b D q, \quad (11-14b)$$

где $q = t p$ — минимальное удельное давление на рабочую поверхность прокладки, $кгс/см^2$; p — рабочее давление среды, $кгс/см^2$; t — коэффициент, принимаемый для плоских прокладок фланцев аппаратов, крышек и днищ равным 1,2, фланцев трубопроводов — 1,5.

Усилие, создаваемое внутренним давлением в аппарате, можно выразить как

$$P = \frac{\pi}{4} D_{пр}^2 p, \quad (11-15)$$

где $D_{пр}$ — внешний диаметр прокладки, $см$.

Усилие P'_6 , передаваемое на болты, принимают равным наибольшему из значений:

$$\left. \begin{aligned} P'_6 &= P'_{пр}; \\ P'_6 &= P''_{пр} + 0,9 P. \end{aligned} \right\} \quad (11-16a)$$

В свою очередь расчетное усилие в болтах P_6 принимают равным наибольшей из величин:

$$\left. \begin{aligned} P_6 &= P''_{пр} + P; \\ P_6 &= P'_6 + 0,01 P. \end{aligned} \right\} \quad (11-16b)$$

Внутренний диаметр резьбы болтов или шпилек фланцевого соединения $d_{вн}$ определяют по формуле

$$d_{вн} = 1,13 \sqrt{\frac{P_6}{Z \sigma_6}}, \quad (11-17)$$

где Z — число болтов, кратное четырем; $\sigma_6 = k_6 \sigma_6^t$ — допускаемое напряжение для материала болтов.

Значение поправочного коэффициента k_6 принимают в зависимости от наружного диаметра болтов:

$d_6, \text{ мм}$	12	14	16	18	20	22	>22
k_6	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Значения условных допускаемых напряжений для материала болтов σ_6^t приведены в табл. 11-6, причем температуру материала фланца и болтов принимают равной расчетной температуре среды.

Нормальный шаг между осями болтов и шпилек составляет 3,5—4 d_6 ; из соображений плотности соединения максимальный шаг не должен превышать 5 d_6 .

По методике РТМ 42-62 фланцы рассчитывают на прочность в следующем порядке [Л. 75].

а) Плоские круглые фланцы из пластичных материалов [Л. 82, 87]. Примем в качестве расчетной высоту фланца h (рис. 11-6, а). Величину h определяют по одной из формул:

$$h = 4,26 \sqrt[3]{\frac{1}{E^t} [P_6 (D_6 - D_{вн} - S - d_6) - 1,6 D_{вн} \sigma_6^t S^2 \eta]} , \text{ см}; \quad (11-18a)$$

Таблица 11-6

Условные допускаемые напряжения для болтов (шпилек) σ_B^t

Температура, °C	Стали марок							
	15, Ст. 3	20, Ст. 4	25, Ст. 5	30	35	40	30ХМА	25Х2МФА (ЭИ10)
20	900	1 020	1 130	1 200	1 300	1 400	2 400	3 000
100	860	970	1 070	1 150	1 260	1 340	2 250	2 800
200	830	930	1 010	1 100	1 200	1 300	2 050	2 750
250	810	900	970	1 040	1 070	1 150	1 950	2 700
300	780	850	900	930	970	1 010	1 850	2 600
350	690	740	800	830	860	890	1 750	2 450
375	640	690	750	770	800	830	1 650	2 300
400	600	640	700	720	750	770	1 600	2 100
425	550	600	640	660	680	700	1 360	1 820
450	—	460	490	510	530	550	1 100	1 560
460	—	—	—	—	—	—	1 000	1 450
470	—	—	—	—	—	—	920	1 320
480	—	—	—	—	—	—	820	1 200
490	—	—	—	—	—	—	720	1 080
500	—	—	—	—	—	—	620	960
510	—	—	—	—	—	—	—	840
520	—	—	—	—	—	—	—	740

$$h = 1,19 \sqrt[3]{\frac{P_6 (D_6 - D_{np} - d_6) (D_\phi + D_B)}{E^t z^2 \eta \Psi_d (D_\phi - D_B)}}, \text{ см}; \quad (11-18б)$$

$$h = \frac{0,84}{\sqrt{\frac{D_\phi - D_B}{D_6 - D_B - S} - \frac{D_\phi - D_6}{D_6}}} \times \sqrt[3]{\frac{P_6}{\sigma_t^t \eta} - \frac{1,4 D_B S^2}{D_6 - D_B - S - d_6}}. \quad (11-18в)$$

В приведенных формулах приняты следующие обозначения:

E^t — модуль упругости материала фланца при соответствующей температуре, кгс/см^2 ; σ_t^t — предел текучести материала при той же температуре, кгс/см^2 ; P_6 — расчетное усилие в болтах, кгс/см^2 ; η — поправочный коэффициент (см. табл. 11-4); Ψ_d — допускаемый угол искривления фланца в кольцевом направлении: для прокладок из паранита

$\Psi_d = 4 \cdot 10^{-4}$, из резины — $3 \cdot 10^{-3}$, для металлических прокладок и беспрокладочных соединений — $2 \cdot 10^{-5}$.

Другие величины, входящие в формулы, обозначены на рис. 11-6, а.

При $D_y \geq 0,4 \text{ м}$ следует применять формулы (11-18а) и (11-18б), причем брать большее из двух значений h . Формулы (11-18б) и (11-18в) применяют для определения h при $D_y < 0,4 \text{ м}$.

б) Круглые фланцы с конической шейкой из пластичных материалов (рис. 11-6б). Высоту плоской части фланца h принимают на основе расчета по формулам:

при $D_y \geq 0,4 \text{ м}$

$$h = 1,5 \sqrt[3]{\frac{P_6 l_1 (D_\phi + D_B)}{E^t z^2 \eta \Psi_d (D_\phi - D_B)}}; \quad (11-19а)$$

при $D_y < 0,4 \text{ м}$ применима формула (11-19а), а также формула

$$h = \frac{0,84}{\sqrt{\frac{D_\phi - D_B}{D_6 - D_B - S} - \frac{D_\phi - D_6}{D_6}}} \times \sqrt[3]{\frac{P_6}{\sigma_t^t \eta} - \frac{0,7 D_B k}{l_2}}, \quad (11-19б)$$

причем выбирают большее значение h .

В формулах (11-19а) и (11-19б) принято:

для неметаллических прокладок $l_1 = 0,5 (D_6 - D_{np} - d_6)$;
для металлических прокладок $l_1 = 0,5 (D_6 - D_{np} - b_0 - d_6)$;

для линзовых прокладок $l_1 = 0,5 (D_6 - D_{np})$;
независимо от материала $l_2 = 0,5 (D_6 - D_B - S - d_6)$;
для линзовых прокладок $l_2 = 0,5 (D_6 - D_{np})$;

k — коэффициент приведения $k = f(\gamma)$,

$$\gamma = \frac{2h_B}{\sqrt{D_B (S_1 - S)}}.$$

При $\gamma \geq 1$ и $h \geq S_1$ $k = 0,78 S_1^2$.

¹ D_y — условный проход, т. е. диаметр фланца, фитинга или другой арматуры, которые можно присоединять к данной серии труб с фиксированным диаметром. Условные проходы стандартизованы ГОСТ 355-52.

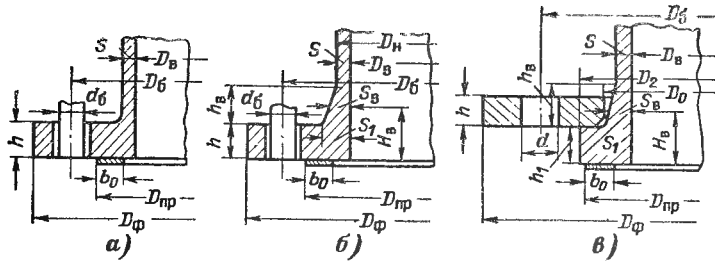


Рис. 11-6. Цельные фланцы.

а — плоский круглый без шейки; *б* — круглый с конической шейкой; *в* — свободный.

При $\gamma < 1$ и $h \geq S_1$

$$k = 0,78 [(S_1^2 - S) \gamma + S^2].$$

Для фланцев с $D_y \geq 0,4$ м расчетные толщина втулки S_B и ее высота H_B определяются по формулам:

$$S_B = 1,1 \sqrt{\frac{1}{D_B \sigma_T^t \eta} \left[P_6 l_2 - 2,65 \cdot 10^{-3} E^t h^3 \times \left(\frac{D_{\phi}}{D_B} - 1 \right) \right]}; \quad (11-20^*)$$

$$H_B = 0,5 \left(20 D_{\phi} \frac{\sigma_T^t}{E^t} + h \right). \quad (11-21)$$

Если по расчету получается $H_B \leq h$, то конструкцию фланца можно принять без конической втулки. Высота конической втулки h_B для фланца может быть определена по одной из формул:

для кованных и приварных фланцев

$$h_B = 2,5 (S_1 - S); \quad (11-22a)$$

для литых фланцев

$$h_B = 5 (S_1 - S). \quad (11-22б)$$

Литые фланцы во всех случаях следует выполнять с конической втулкой.

в) Свободные фланцы. Конструкция такого фланца показана на рис. 11-4, *в*. Предварительно по D_y выбирают следующие размеры фланца: диаметр болтовой

окружности D_6 , наружный диаметр бурта D_2 , средний диаметр прокладки $D_{\text{пр}}$, число болтов z .

Наружный диаметр фланца определяют по формуле

$$D_{\phi} = D_6 + 2d_6 + 0,005 \text{ м}. \quad (11-23)$$

Расчетное значение округляют до ближайшего размера D_{ϕ} , оканчивающегося на 0 или на 5 (мм). Внутренний диаметр фланца находят из расчета:

при $D_y \leq 0,05$ м

$$D_0 = D_B + 2S_1 + 0,003 \text{ м}; \quad (11-24a)$$

при $D_y \leq 0,05$ м

$$D_0 = D_B + 2S_1 + 0,006 \text{ м}. \quad (11-24б)$$

Полученные значения округляют до ближайших больших размеров, в первом случае — до четных, а во втором — до оканчивающихся на 5 или на 0 (мм).

Высоту свободного фланца h вычисляют по формулам:

при $D_y \geq 0,4$ м

$$h = 1,3 \sqrt{\frac{P_6 l (D_{\phi} - D_0)}{D_{\phi} \sigma_T^t \eta (D_{\phi} - D_0 - 2d) \frac{D_{\phi}}{D_0}}}; \quad (11-25)$$

при $D_y \geq 0,05$ м

$$h = \frac{0,8}{\sqrt{\frac{D_{\phi} - D_0}{D_6 - D_2} \frac{D_{\phi} - D_6}{D_6}}} \times \sqrt{\frac{P_6 (D_B - D_0)}{\sigma_T^t \eta (D_{\phi} - D_0 - 2d)}}, \quad (11-26)$$

где $l = 0,5(D_6 - D_{\text{пр}} - b_0 - d_6)$ — для фланцев с прокладками между плоскими поверхностями;
 $l = 0,5(D_6 - D_{\text{пр}} - d_6)$ — для фланцев с прокладкой в выступе-впадине.

Высоту бурта без конической втулки h_1 при $D_y \geq 0,4$ м определяют по формулам (11-27a) и (11-27б), выбирая из полученных наибольшее значение. При $D_y < 0,4$ м выбирают наибольшее значение h_1 , получаемое по формулам (11-27б) и (11-27в):

$$h_1 = 4,26 \sqrt[3]{\frac{1}{E^t} [P_6 (D_2 - D_B - S) - 1,6 D_B \sigma_T^t \eta S^2]}; \quad (11-27a)$$

* Для фланцев с $D_y > 0,4$ м толщину втулки расчетом не определяют.

$$h_1 = 1,19 \sqrt[3]{\frac{P_6 (D_2 - D_B) (D_2 + D_B)}{E^t z^2 \eta \Psi_d (D_2 - D_B)}}; \quad (11-27б)$$

$$h_1 = 0,8 \sqrt{\left(\frac{D_2 - D_B - S}{D_2 - D_B}\right) \left(\frac{P_6}{\sigma_T^t \eta} - \frac{1,56 D_B S^2}{D_2 - D_B - S}\right)^2}; \quad (11-27в)$$

$$h_1 = 0,8 \sqrt{\left(\frac{D_2 - D_B - S}{D_2 - D_B}\right) \frac{P_6}{\sigma_T^t \eta} - \frac{1,56 D_B k}{D_2 - D_B - S}}. \quad (11-27г)$$

Высота бурта во фланце с конической втулкой h_1 при $D_y \geq 0,4$ м может быть определена по формуле (11-27б); при $D_y < 0,4$ м берут большее значение h_1 , полученное по формулам (11-27в) и (11-27г).

Для фланцев с $D_y \geq 0,4$ м расчетная толщина втулки S_B и ее расчетная высота H_B определяются по формулам:

$$S_B = 1,1 \sqrt{\frac{1}{D_B \sigma_T^t \eta} \left[P_6 (D_2 - D_B - S) - \right.} \\ \left. - 2,65 \cdot 10^{-3} E^t h_1^3 \left(\frac{D_2}{D_B} - 1 \right) \right]}; \quad (11-28)$$

$$H_B = 0,5 \left(20 D_2 \frac{\sigma_T^t}{E^t} + h_1 \right), \quad (11-29)$$

причем не должно быть $H_B < h_1$.

Размеры S_B и H_B при $D_y < 0,4$ м определяют конструктивно.

11-5. ПРОВЕРКА НАПРЯЖЕНИЙ В ТРУБАХ И В КОРПУСЕ АППАРАТА ЖЕСТКОЙ КОНСТРУКЦИИ

В теплообменниках с жесткими соединениями между обечайкой и трубными решетками возникают дополнительные напряжения в трубах и корпусе аппарата вследствие различной степени их удлинения при нагреве или при охлаждении. Эти напряжения, являющиеся следствием различия температур и конструкционного материала стенок труб и корпуса, могут привести к нарушению плотности трубчатки, деформации труб, истиранию их поперечными перегородками и другим неблагоприятным явлениям.

Для приближенного определения напряжений, возникающих в трубчатке жесткой конструкции, примем следующие допущения: установленные трубы прямые и могут подвергаться только растяжению или сжатию; большая жесткость трубных решеток не позволяет им деформироваться в зоне заделки труб; деформация решеток происходит только на периферии, за пределами расположения труб.

Такие допущения предопределяют некоторую переоценку осевой нагрузки, вызываемой разностью температур корпуса и труб, и приводят к некоторому завышению запаса прочности.

Величину осевых сил в трубчатке Q' , возникающих под действием давления среды и стремящихся разорвать трубки и раздвинуть трубные решетки, можно выразить формулой

$$Q' = 0,785 (D_B^2 - nd_n^2) p_{мт} + 0,785 nd_n^2 p_t, \quad (11-30)$$

где D_B — внутренний диаметр корпуса греющей камеры (рис. 11-7), равный кругу, на который распространяется давление среды в межтрубном пространстве, см; d_B и d_n — внутренний и наружный диаметры труб, см; n — число труб в трубной решетке; $p_{мт}$ и p_t — давление среды в межтрубном и трубном пространствах, кгс/см².

Сила Q' воспринимается корпусом аппарата и трубами, т. е.

$$Q' = Q'_к + Q'_т,$$

где $Q'_к$ — осевая сила, возникающая в корпусе от давления среды в аппарате и отрывающая его от трубной решетки, кгс; $Q'_т$ — осевая сила, возникающая в трубах от давления среды в аппарате и отрывающая их от трубной решетки, кгс.

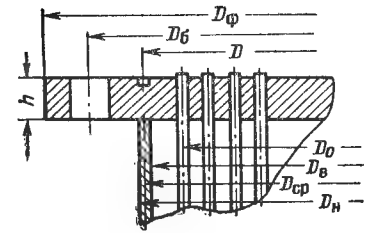


Рис. 11-7. Узел трубчатки жесткой конструкции.

Силы Q'_k и Q'_t пропорциональны отношению произведений площадей их стенок на модуль упругости и определяются по формулам:

$$Q'_k = \frac{F_k E_k}{F_k E_k + F_t E_t} Q', \text{ кгс}; \quad (11-31a)$$

$$Q'_t = \frac{F_t E_t}{F_k E_k + F_t E_t} Q', \text{ кгс}, \quad (11-31б)$$

где $F_k = 0,785(D_n^2 - D_b^2)$ — площадь сечения корпуса, см^2 ;
 $F_t = 0,785n(d_n^2 - d_b^2)$ — площадь сечения труб, см^2 ;
 D_n — наружный диаметр корпуса, см ; E_k и E_t — соответственно модули упругости материала труб и материала корпуса, кгс/см^2 .

Осевые напряжения σ'_k и σ'_t , возникающие в корпусе и в трубах аппарата, равны:

$$\sigma'_k = \frac{Q'_k}{F_k} = \frac{E_k}{F_k E_k + F_t E_t} Q', \text{ кгс/см}^2; \quad (11-32a)$$

$$\sigma'_t = \frac{Q'_t}{F_t} = \frac{E_t}{F_k E_k + F_t E_t} Q', \text{ кгс/см}^2. \quad (11-32б)$$

Напряжения σ''_k и σ''_t , возникающие в корпусе и в трубах аппарата вследствие различия температур их стенок, можно выразить уравнениями:

$$\sigma''_k = \frac{E_k F_t E_t}{F_k E_k + F_t E_t} (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k), \text{ кгс/см}^2; \quad (11-33a)$$

$$\sigma''_t = \frac{F_k E_k F_t}{F_k E_k + F_t E_t} (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k), \text{ кгс/см}^2, \quad (11-33б)$$

где Δt_k — разность между рабочей температурой корпуса и температурой окружающего пространства, $^\circ\text{град}$; Δt_t — разность между рабочей температурой труб и температурой окружающей среды (точнее, температурой окружающей среды в момент изготовления греющей камеры), $^\circ\text{град}$; α_k и α_t — коэффициенты линейного расширения материала камеры и труб.

Температурные напряжения создадут равные по величине и противоположные по знаку силы в корпусе Q''_k и в трубах Q''_t , которые отрывают их от трубных решеток:

$$Q''_k = -Q''_t = \frac{F_k E_k F_t E_t}{F_k E_k + F_t E_t} (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k), \text{ кгс}. \quad (11-34)$$

Из уравнений (11-33) и (11-34) можно заключить, что напряжения и силы, возникающие в трубах и в корпусе аппарата, не зависят от их длин, а определяются только соотношением площадей стенок, свойствами материалов и изменением их температур.

Полные силы от совместного действия давления и разности температур составят:
 для корпуса

$$Q_k = Q'_k + Q''_k = \frac{F_k E_k}{F_k E_k + F_t E_t} \times [Q' + (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k) F_t E_t], \text{ кгс}; \quad (11-35a)$$

для трубок

$$Q_t = Q'_t + Q''_t = \frac{F_t E_t}{F_k E_k + F_t E_t} \times [Q' - (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k) F_k E_k], \text{ кгс}. \quad (11-35б)$$

Полные осевые напряжения:
 для корпуса

$$\sigma_k = \sigma'_k + \sigma''_k = \frac{E_k}{F_k E_k + F_t E_t} \times [Q' + (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k) F_t E_t], \text{ кгс/см}^2; \quad (11-36a)$$

для трубок

$$\sigma_t = \sigma'_t + \sigma''_t = \frac{E_t}{F_k E_k + F_t E_t} \times [Q' - (\Delta t_t \alpha_t - \Delta t_k \alpha_k) F_k E_k], \text{ кгс/см}^2. \quad (11-36б)$$

Если суммарные осевые напряжения в корпусе и в трубах, вычисленные по формулам (11-36), не превышают допустимых, то конструкция греющей камеры может быть жесткой; в противном случае необходимо установить компенсирующие устройства.

11-6. РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ ТРУБНОЙ РЕШЕТКИ

Приведенная ниже методика расчета трубных решеток отличается от известных методик расчета использованием наиболее современных принципов, полнее отражающих действительные условия работы теплообменников [Л. 95]. Эта методика пригодна для расчета трубных решеток аппаратов с внутренним давлением обеих сред при соединении труб с решеткой путем развальцовки

или сварки. Рекомендации неприменимы для расчета аппаратов, в которых: а) трубные решетки изготовлены из хрупких материалов (например, из чугуна); б) ударная с циклическими сменами нагрузка при 10 000 циклах за срок службы решетки; в) среда агрессивна и влияние ее на износ материала решетки является решающим.

а) Трубные решетки для теплообменников с U-образными трубами без анкерных связей. Толщину трубной решетки h , закрепленной между фланцами корпуса и крышки (рис. 11-5, з), рассчитывают по формуле

$$h = 0,393 D_{\text{вн}} \sqrt{\frac{p}{100 \sigma_{\text{доп}} \varphi'}}, \quad (11-37)$$

где φ' — коэффициент прочности трубной решетки, принимаемый в пределах, когда $d/t = (0,48-0,75)$; $D_{\text{вн}}/h \leq 40$; $\varphi' = 0,935 - (0,65d/t)$ для решетки при разбивке отверстий по треугольнику; $\varphi' = 0,975 - (0,68d/t)$ для решетки при разбивке отверстий по квадрату; d — диаметр отверстий в трубной решетке; t — шаг между центрами отверстий.

б) Трубные решетки с одной анкерной связью в центре. В такой конструкции аппарата толщина трубной решетки, закрепленной между фланцами корпуса и крышки, может быть определена по формуле

$$h = 0,393 D_{\text{вн}} \sqrt{\frac{1}{100 \sigma_{\text{доп}} \varphi} \left[p - 382 \left(0,4 \sigma_{\text{доп}}^* \right) \frac{f_c}{D_{\text{вн}}^2} \right]}, \quad \text{мм}, \quad (11-38)$$

где f_c — площадь сечения анкерной связи, мм^2 ; при этом должно быть соблюдено условие

$$f_c \geq \frac{\frac{\pi}{4} (D_{\text{вн}}^2 - 1) d_c^2 p}{100 (0,4 \sigma_{\text{доп}}^*)};$$

$\sigma_{\text{доп}}^*$ — номинальное допускаемое напряжение (по табл. 11-1), кгс/см^2 ; d_c — диаметр анкерной связи, мм .

в) Трубные решетки теплообменников с плавающей головкой. При давлении среды со стороны межтрубного пространства толщину неподвиж-

ной трубной решетки, закрепленной между двумя фланцами, определяют по формуле

$$h = 0,393 D_{\text{вн}} \sqrt{\frac{1}{100 \sigma_{\text{доп}} \varphi} \left[p \left(1 - \frac{n d_{\text{н}}^2}{D_{\text{вн}}^2} - \frac{p_0}{2} \right) \right]}, \quad \text{мм}, \quad (11-39)$$

при давлении со стороны трубного пространства пользуются формулой (11-39), заменив $d_{\text{н}}$ на $d_{\text{вн}}$ и p_0 на p_c .

Здесь принято:

n — число отверстий для труб в трубной решетке; $d_{\text{в}}$ и $d_{\text{н}}$ — внутренний и наружный диаметры труб, мм ; p_0 и p_c — допускаемые распределенные по площади решетки противодавления от растянутых (p_0) и сжатых (p_c) труб, равные:

$$P_0 = 77n \frac{P_0^*}{D_{\text{вн}}^2}; \quad (11-40a)$$

$$p_c = 77n \frac{P_c^*}{D_{\text{вн}}^2}, \quad (11-40б)$$

где $P_0^* = P_c^* = \sigma_{\text{ст}} f_{\text{т}}$; } предельные усилия для
 $P_0^* = P_c^* = A d_{\text{н}}$; } трубки, из которых в расче-
те должно быть принято
наименьшее;

$\sigma_{\text{ст}}$ — предел текучести материала труб, кгс/мм^2 ;
 $f_{\text{т}}$ — площадь поперечного сечения трубы, мм^2 ;
 A — эмпирический коэффициент, равный 125 для труб, развальцованных в отверстиях, и 230 — для труб, приваренных к решеткам.

При давлении со стороны трубного пространства толщину подвижной трубной решетки, соединенной с днищем плавающей головки болтами, находят по формуле

$$h = 0,393 D_{\text{н}} \sqrt{\frac{1}{100 \sigma_{\text{доп}} \varphi} \left[p \frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{вн}}} \left(1 - n \frac{d_{\text{в}}^2}{D_{\text{вн}}^2} \right) + \right.} \\ \left. + 382 \frac{P_0}{D_{\text{н}}^3} (D_6 - D_{\text{н}}) - \frac{p_c}{2} \right]}. \quad (11-40в)$$

При давлении со стороны межтрубного пространства толщину подвижной трубной решетки, соединенной с

днищем плавающей головки болтами, определяют по формуле

$$h = 0,393 D_n \sqrt{\frac{1}{100 \sigma_{\text{доп}} \Psi} \left[p \frac{D_n}{D_{\text{вн}}} \left(1 - n \frac{d_n^2}{D_{\text{вн}}^2} \right) + \right.} \\ \left. + 382 \frac{P_6}{D_n^3} (D_6 - D_n) - \frac{P_0}{2} \right], \quad (11-41)$$

где D_n — диаметр окружности прокладки, мм; $p_6 = \sigma_{\text{доп.б}} F_6 Z$ — суммарное допускаемое усилие в болтах, кгс; $\sigma_{\text{доп.б}}$ — допускаемое напряжение для материала болтов, кгс/мм²; F_6 — сечение болта, мм²; Z — число болтов.

г) Трубные решетки в теплообменниках жесткой конструкции [Л. 39]. Расчетная формула для определения толщины трубной решетки жесткой конструкции имеет вид:

$$h = \sqrt{\frac{Q_k z_r}{\sigma_{\text{доп}} z_3} + \frac{9 P_6 (D_6 - D) \beta_2^2}{\sigma_{\text{доп}} D_6 z_4}} + C, \text{ мм}, \quad (11-42)$$

причем некоторые величины представляют собой алгебраические комплексы:

$$\beta_1 = \frac{D_{\text{ср}}}{D_0} = \frac{D_n + D_{\text{вн}}}{2 D_0};$$

$$\beta_2 = \frac{D_6}{D};$$

$$z_2 = \frac{3}{2} [(1 - \beta_1^2) - 4 \beta_1^2 \ln \beta_1];$$

$$z_3 = \pi (1 + 2 \beta_1^2);$$

$$z_4 = \pi (1 + 2 \beta_2^2).$$

В приведенных формулах принято:

Q_k — полное осевое усилие, определяемое по уравнению (11-35а); $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение на изгиб, кгс/см²; D_6 — диаметр окружности болтов, мм (рис. 11-7); D — средний диаметр прокладки, мм; P_6 — усилие затяга болтов, определяемое по формуле (11-16б); D_0 — диаметр окружности крайнего ряда трубок, мм; D_n и $D_{\text{вн}}$ — наруж-

ный и внутренний диаметры обечайки корпуса аппарата, мм.

Значения z_2 находят в следующей зависимости от β_1 :

β_1		1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
z_2		0	0,5	1,0	1,6	2,2	2,9	3,6

Значения z_3 и z_4 находят в следующей зависимости от β_2 :

β_2		1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
z_3		9	10,1	10,8	11,5	12,3	13,0	13,7
z_4		9	10,1	10,8	11,5	12,3	13,0	13,7

Найденная по формуле (11-42) толщина трубной решетки должна быть проверена на изгиб ромбического участка (рис. 11-8) по уравнению

$$\sigma = \frac{P_{\text{макс}}}{3,6 \left(1 - 0,7 \frac{d_n}{e} \right) \left(\frac{h}{e} \right)^2} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (11-43)$$

где $P_{\text{макс}}$ — максимально возможное избыточное давление на трубную решетку, кгс/см²; d_n — наружный диаметр труб, мм; h — толщина трубной решетки, мм; $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение на изгиб, кгс/см²;

$$e = \frac{t \sin \alpha + t (1 + \cos \alpha)}{2}, \text{ мм}.$$

После проведенных расчетов трубную решетку проверяют по напряжениям, возникающим в местах крепления труб, на основании следующих соображений.

1. Закрепление труб в трубной решетке методом развальцовки. Наиболее распространенным показателем степени развальцовки служит суммарная деформация трубы (уменьшение толщины ее стенки) и вальцованного отверстия в решетке — очка (увеличение его диаметра), получаемая с момента соприкосновения стенки трубы со стенкой очка.

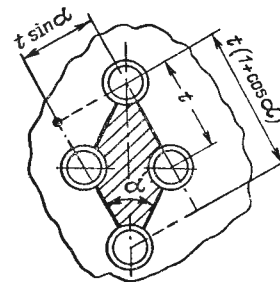
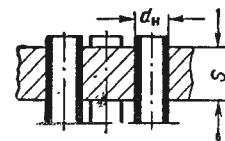


Рис. 11-8. К расчету прочности трубной решетки.

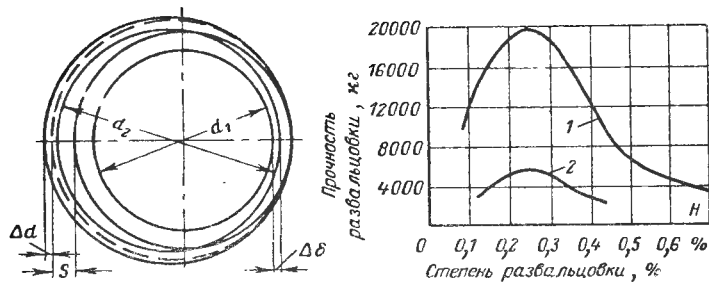


Рис. 11-9. Схема к определению степени развальцовки и диаграмма для определения прочности развальцовки труб.

1 — труба диаметром 102/90 мм и трубная решетка толщиной 30 мм; 2 — труба диаметром 38/32 мм и трубная решетка толщиной 25 мм.

Если обозначить (рис. 11-9, а) через $\Delta\delta$ — величину остаточной деформации стенки трубы; Δd — величину деформации очка; K — величину дополнительного расширения трубы после соприкосновения с очком, то зависимость между этими величинами можно записать как

$$K = 2\Delta\delta + \Delta d. \quad (11-44)$$

Это же можно выразить как

$$K = d_2 - (d_1 + s), \quad (11-45)$$

где d_1 — внутренний диаметр трубы до развальцовки;
 d_2 — внутренний диаметр трубы после развальцовки;
 s — начальный зазор между трубой и стенкой очка.

Для оценки качества развальцовки принят термин «степень развальцовки» H , величина которой может быть выражена как

$$H = \frac{d_2 - (d_1 + s)}{d_1 + 2\delta + s} 100. \quad (11-46)$$

Степень развальцовки в пределах от 0,15 до 0,35% даст наиболее высокие показатели прочности и плотности вальцовочного соединения (рис. 11-9, б).

При вальцовке труб сила Q_L , приходящаяся на единицу длины периметра трубы, должна быть равна:

$$Q_L = \frac{Q_T}{\pi d_n n}, \text{ кгс/см}, \quad (11-47)$$

где Q_T — полная осевая сила в трубах, определяемая по формуле (11-31б); n — число труб в трубном пучке.

Величина Q_L должна быть:

при вальцовке без отбортовки — 40 кгс/см;

при развальцовке с односторонней отбортовкой — 50 кгс/см;

при развальцовке с двусторонней отбортовкой — 70 кгс/см.

Для надежной развальцовки полученная по формуле (11-42) толщина трубной решетки $h_{\min}$ должна быть не менее:

$$h_{\min} = \frac{d_n}{8} + 5 \text{ мм для стальной трубной решетки};$$

$$h_{\min} = \frac{d_n}{8} + 10 \text{ мм для трубной решетки из меди}.$$

2. Закрепление труб в трубной решетке пайкой. Напряжение среза $\sigma_{ср}$ в шве должно быть не больше допускаемого; его определяют как

$$\sigma_{ср} = \frac{Q_T}{\pi d_n n t_n}, \quad (11-48)$$

где t_n — глубина пайки, см.

11-7. РАСЧЕТ ОПОР НА ПРОЧНОСТЬ

Опоры вертикальных теплообменных аппаратов выполняют обычно сварными из стальных листов и проката (рис. 11-10, а). Число опор — от двух до четырех. Их расчет производят по максимальному весу аппарата $G_{\max}$ при заполнении его водой для проведения гидравлического испытания.

Общая площадь всех опор S должна быть:

$$S \geq \frac{G_{\max}}{\sigma_{\text{фунд}}}, \text{ см}^2. \quad (11-49)$$

Допускаемое напряжение $\sigma_{\text{фунд}}$ в фундаментах из бетона марок 65 и 90 принимают равным 20 кгс/см², в фундаментах из кирпичной кладки — 7–8 кгс/см².

Нагрузка, приходящаяся на одну из n опор,

$$Q = \frac{G_{\max}}{n}. \quad (11-50)$$

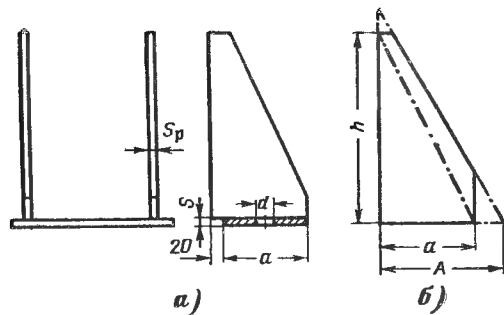


Рис. 11-10. Приварные лапы вертикального аппарата (а) и эскиз к расчету приварных лап (б).

Толщину ребра опор принимают по формуле

$$S_p = \frac{2,24Q}{k m \sigma_{\text{доп}}}, \text{ см}, \quad (11-51)$$

где m — число ребер в опоре; a — вылет опоры (рис. 11-10, б); $\sigma_{\text{доп}}$ — допускаемое напряжение на изгиб, кгс/см^2 ; k — коэффициент, зависящий от гибкости ребра по его гипотенузе; для его определения находят радиус инерции ребра

$$r = 0,289 S_p, \text{ см}, \quad (11-52)$$

и гибкость его по гипотенузе

$$\lambda = \frac{l}{r} = \frac{l}{0,289 S_p}. \quad (11-53)$$

Определив λ , находят k по следующей зависимости:

λ	0	25	50	75	100	125	150	175	200
k	1,0	0,95	0,89	0,77	0,61	0,45	0,33	0,25	0,2

Рекомендуется следующий порядок расчета ребра:
1) задаются коэффициентом k , числом ребер в одной опоре m и вылетом опоры a , затем по формуле (11-51) определяют толщину ребра S_p ;

2) по формуле (11-53) определяют гибкость ребра по гипотенузе λ ;

3) по величине λ находят в таблице значение k , которое должно быть равно или превышать принятое в начале расчета. При несовпадении расчет повторяют.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие методы расчета на прочность вы знаете и в чем их сущность?
2. Какие усилия кладут в основу расчета обечайки на прочность: тангенциальные или осевые? Напишите формулы, выражающие эти усилия.
3. Какие днища и крышки применяют чаще всего в теплообменных аппаратах?
4. Какие конструкции фланцев применяют чаще всего в теплообменных аппаратах?
5. Из чего складываются осевые усилия в трубчатке аппарата жесткой конструкции?
6. Что такое степень развальцовки, от чего она зависит и как влияет на плотность и прочность вальцовочного соединения?

Глава двенадцатая

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

12-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для изготовления теплообменников применяют сравнительно ограниченный комплект основных элементов и узлов. Все теплообменники (кроме оросительных) имеют корпус, выполняемый, как правило, разъемным и состоящий из кожуха, крышек и днищ. Кожух соединяется с крышками и днищами с помощью фланцев или жестким швом (сварным или клепаным). К корпусу приваривают или прикрепляют другим способом штуцера и бобышки для присоединения трубопроводов, арматуры и контрольно-измерительной аппаратуры, лапы и опоры для установки и крепления аппарата на месте. В рекуперативных теплообменных аппаратах для передачи тепла устанавливается поверхность теплообмена. В отдельных случаях в аппаратах используются мешалки, скребки, питатели, шлюзовые затворы и некоторые другие устройства. Сосуды внутренним диаметром более 800 мм должны быть снабжены лазами для внутреннего осмотра. Диаметр круглых лазов должен быть не менее 400 мм, размеры овальных лазов — не менее 300×400 мм. Сосуды внутренним диаметром 800 мм и менее должны иметь отверстия, служащие для осмотра стенки сосуда и для удаления из него грязи и шлама. В сосудах со съёмными днищами или с крышками лазы не предусматриваются.

Если установленные в сосуде мешалки, змеевики, перегородки и другие приспособления препятствуют внутреннему осмотру, они должны быть съёмными.

Рубашки для наружного обогрева или охлаждения сосудов могут изготавливаться как съёмными, так и приварными.

Теплообменные аппараты изготовляют обычно на специализированных заводах. Значительная часть продукции этих заводов нормализована и представлена в каталогах и ценниках. Кроме специализированных заводов, теплообменники изготовляют по индивидуальным заказам и чертежам неспециализированные машиностроительные заводы и мастерские. Независимо от места проектирования и изготовления теплообменные аппараты, предназначенные для работы под давлением выше 0,7 ат избыточных, должны соответствовать правилам Госгортехнадзора в отношении устройства, монтажа и эксплуатации. Следующие сосуды не подлежат контролю инспекции Госгортехнадзора:

а) водогрейные котлы и приборы парового и водяного отопления;

б) сосуды, для которых производство емкости в литрах на рабочее давление в избыточных атмосферах не превышает 500, причем рабочее давление не превышает 16 ат, а температура — 200° С;

в) части машин, не представляющие самостоятельных сосудов (цилиндры паровых машин, сепараторы пара, сухопарники и т. п.);

г) экспериментальные сосуды емкостью до 25 л независимо от давления и температуры;

д) сосуды, работающие под вакуумом;

е) сосуды, работающие под любым давлением воды и неядовитых жидкостей при температуре, не превышающей температуру их кипения при атмосферном давлении.

В соответствии с «Правилами устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением» за правильность конструкции сосуда, его расчет на прочность и выбор материала отвечает организация, разработавшая конструкцию и выполнившая ее расчет. Все изменения, могущие возникнуть в процессе изготовления или монтажа сосуда, должны быть согласованы между организацией, составляющей проект, и организацией, потребовавшей изменения проекта, оформлены в виде протокола и подписаны обеими сторонами.

12-2. ЧУГУННЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Литые чугунные теплообменники применяют для тепловых и технологических процессов с внутренним давлением до 6—8 ат и температурой стенки до 200° С.

Из серого чугуна изготовляют отопительные трубы-калориферы разных типов и ребристые трубы для водяных экономайзеров паровых котлов. В химической промышленности получили широкое распространение аппараты из высококремнистых чугунов (0,3—0,6% углерода, 12—18% кремния и 0,3—0,8% марганца): ферросилида, термосилида, айронака, диорайрона и др. Из этих химически стойких чугунов изготовляют концентрационные и денитрационные колонны, смесители, конденсаторы, распылители кислот, центробежные насосы, реторты, чаны, трубы и другое оборудование, применяемое в производстве серной, азотной, уксусной, фосфорной и других кислот, органических продуктов и солей редких металлов.

Чугунные теплообменные аппараты выполняют в виде отливок, представляющих собой цилиндрические или полусферические сосуды с крышками различной формы.

Разъемы между отдельными частями корпуса выполняют в виде фланцевых соединений, обрабатываемых механически по уплотняющим поверхностям (см. рис. 1-2). Наружные теплопередающие поверхности чугунных аппаратов выполняют в виде паровых рубашек или плотно прилегающих к стенке змеевиков, а внутренние — в виде змеевиков внутри кожуха.

Элементы теплообменных аппаратов типа змеевиков, спиральных секций или гофрированных пластин из чугуна не изготовляют, а трубчатки с чугунными трубными решетками и закрепленными в них трубами встречаются исключительно редко вследствие трудности изготовления таких конструкций методом литья и соединения их с другими деталями из-за хрупкости чугуна.

Монтаж аппаратов из чугуна, особенно высококремнистого, производят очень тщательно и осторожно. Изделия из этого чугуна нельзя бросать, ударять по ним при сборке металлическим молотком, нажимать для подгонки ломом, нагружать весом других деталей и перетягивать при сборке крепящие их болты.

Высококремнистый чугун дает трещины при быстром нагреве и при быстром охлаждении. Чугунные аппараты не выдерживают перекосов и прогибов, поэтому их устанавливают на очень прочных бетонных фундаментах.

Повышение производительности труда в технологических процессах достигается наряду с механизацией и автоматизацией увеличением параметров процессов (температуры и давления) и увеличением емкости аппаратов, в которых протекает процесс. В последнее время стальные аппараты начали вытеснять чугунные аппараты, которые могут быть выполнены только ограниченных размеров и для сравнительно низких давлений. При прогрессивной технологии аппаростроения, основанной на использовании фасонных и специальных профилей стального проката, а также на сборке деталей и узлов методом автоматической электросварки, нельзя широко использовать чугунное литье. В аппаростроении чугун малоперспективен. Поэтому ниже рассматриваются особенности технологии изготовления и монтажа теплообменных аппаратов, изготавливаемых главным образом из стали.

Основным материалом для изготовления теплообменной аппаратуры служит прокатная сталь различных марок. Стальные теплообменные аппараты нашли широкое применение в энергетической, химической, нефтеперерабатывающей, пищевой, легкой и других отраслях промышленности. Многие аппараты массового применения (теплофикационные подогреватели, конденсаторы, испарители, выпарные аппараты, ректификационные колонны некоторых типов и др.) нормализованы и изготавливаются специализированными заводами и цехами в больших количествах.

Разработка технологического процесса

Аппарат изготавливают на основе технологического процесса, степень совершенства которого определяет качество, трудоемкость и сроки изготовления изделия, а также потребность в механосборочном и специальном оборудовании и квалифицированной рабочей силе. Технологический процесс выбирают обычно после сопоставления нескольких вариантов. В технологическом процессе предусматривается порядок изготовления отдельных деталей и узлов и последовательность сборки изделия.

В первой части разработки технологического процесса содержатся подробные сведения о качестве и порядке изготовления аппарата в соответствии с техническими условиями: класс аппарата, марки материалов по ГОСТ, способы заготовительных операций, условия сварки, требования к сварным швам, режимы термической обработки, методы межоперационного и окончательного контроля, условия испытания готового изделия. Вторая часть разработки технологического процесса посвящается выбору рациональных операций обработки деталей, последовательности рабочих операций, а также выбору наиболее рациональных оборудования, инструмента и приспособлений. В третьей части разработки определяется квалификация рабочих для различных операций технологического процесса, трудоемкость работ по каждой операции и по всему процессу изготовления изделия, продолжительность каждой операции, количество расходуемых вспомогательных материалов, размер необходимой производственной площади и место монтажа.

Разработанный технологический процесс изготовления деталей и сборки аппарата вносят в технологические карты и инструкции.

Заготовки деталей

Заготовками деталей служат обычно сортовой и листовой прокат, трубы, штамповки, поковки и отливки. Листовой прокат используется для заготовки кожухов, днищ и крышек, трубных решеток, фланцев, перегородок, тарелок, лап и различных штампованных изделий. Из сортового проката изготавливают заготовки каркасов трубочаток, анкерных связей, крупных фланцев, бобышек, поволоков и штамповок. Из труб изготавливают штуцера, поверхности нагрева, барботеры и многие другие узлы и детали.

Из заготовительных цехов заготовки поступают в кузнечно-прессовые, сварочные и механические цехи, где последовательно проходят все необходимые операции, после чего поступают в отделение или цех сборки.

Изготовление цилиндрического кожуха теплообменного аппарата

В современном аппаратостроении сварка служит важнейшим технологическим процессом, обеспечивающим при жестком соединении стальных элементов высокую прочность и плотность шва, высокую производительность труда и значительную экономию металла. Изготовление сосудов путем сварки может производиться только при наличии на предприятиях и монтажных площадках необходимых условий и средств для производства сварки, а также контроля качества сварных соединений в соответствии с требованиями «Правил» Госгортехнадзора. Разрешение на изготовление сварных сосудов выдается местными органами Госгортехнадзора. При отсутствии на месте монтажа необходимых средств для производства сварки и контроля ее качества допускается выдача разрешений на производство сосудов с ограничениями, которые должны быть отмечены в специальном акте.

Стальные элементы теплообменных аппаратов сваривают, как правило, методом дуговой сварки (ручной, полуавтоматической, автоматической под флюсом, аргоно-

Таблица 12-1

Допускаемая высота прогиба или волнистости листов, мм

Толщина листа, мм	Ширина листа, мм						
	до 1 200	1 200— 1 500	1 500— 1 800	1 800— 2 100	2 100— 2 700	2 700— 3 000	
6—10	16	20	24	28	32	36	—
10—12	12	14	16	20	24	28	32
12—20	12	14	16	18	22	25	28
20—25	12	14	16	18	20	22	24
25—50	12	14	14	14	16	18	20
50—100	6	8	10	11	12	14	16

дуговой) или методом контактной сварки (точечной, роликовой, стыковой). Газовую сварку применяют в исключительных случаях: для сварки тонких стальных листов (≤ 2 мм) и стальных труб малого диаметра (до 32 мм), а также при изготовлении изделий из цветных металлов. При этом сварные соединения не должны соприкасаться с химически активными средами и подвергаться воздействию высоких вибрационных и ударных нагрузок при повышенных температурах.

Цилиндрическая часть кожуха может быть выполнена в виде обечайки диаметром до 800 мм из одного свальцованного в цилиндр листа, обечайки диаметром до 1 600 мм — из двух листов, свальцованных в полуцилиндры (корыта), и из нескольких обечаек при большой длине кожуха. Листовой металл, предназначенный для изготовления кожуха, подвергают предварительной обработке, заключающейся в правке и разделительной резке листов, что облегчает их транспортировку и последующие операции обработки.

Правка. Листовую сталь, предназначенную для изготовления кожухов и других деталей сосудов, проверяют перед разметкой и резкой на волнистость и на прогиб, и если они не превышают норм, приведенных в табл. 12-1, листы направляют на разметку и резку. Волнистость и прогиб листов устраняют на листопрямильных вальцах, представляющих собой машину из двух рядов валков с общим числом их от 5 до 11, установленных в шахматном порядке. На рис. 12-1 показана схема девятивалковой листопрямильной машины. Перед вальцами и за ними устанавливают роликовые столы. Силой

трения между нижним крайним валком и листом последний втягивается в машину и проходит между верхним и нижним рядами валков, изгибаясь попеременно вверх и вниз. Пластический изгиб в разных направлениях делает лист плоским. Листы проходят между валками несколько раз в обоих направлениях со скоростью от 3 до 10 м/мин. Диаметр валков составляет 0,9—0,95 от величины их шага, равного 200—400 мм. Заготовки для обечаек, предназначенные для изгиба на листогибочных вальцах, предварительной правке на листопрямильных машинах не подвергают.

Разделительная резка листов. Для облегчения операций обработки листовых заготовок листы больших габаритов разрезают предварительно на более мелкие листы. Для резки листов из углеродистых сталей более всего распространена газокислородная (газовая) резка. Для резки листов из высоколегированных хромоникелевых и хромистых сталей этот способ непригоден, так как образующиеся на кромках листа тугоплавкие окислы хрома препятствуют процессу резки. Хорошее качество и высокую производительность обеспечивают методы кислородно-флюсовой и плазменно-дуговой резки высоколегированных сталей.

Для резки листов применяют также автоматическую электродугую резку. При этом способе разрез получается с менее чистыми кромками и образуется более глубокая зона термического влияния с неблагоприятно измененной (крупнозернистой) структурой. Если из-за отсутствия других возможностей дуговая резка неизбежна, рекомендуется удалять металл с кромок разреза на глубину не менее 5—7 мм.

Разметка. Габаритные размеры листа должны быть такими, чтобы после разметки цилиндра с необходимыми припусками на обработку отходы металла были минимальными. Коэффициент использования раскраиваемого листа должен составлять около 90%.

Длину развернутой обечайки определяют по нейт-

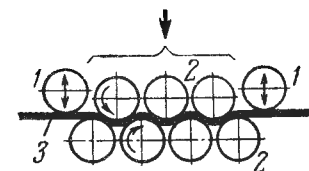


Рис. 12-1. Схема девятивалковой листопрямильной машины.

1 — направляющие валки; 2 — изгибающие валки; 3 — лист.

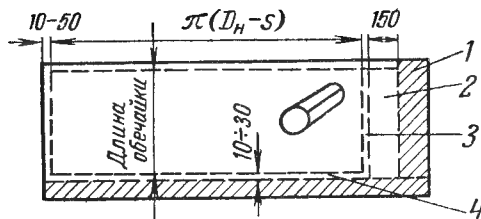


Рис. 12-2. Раскройная карта обечайки.

1 — отходы листа; 2 — припуск на изготовление образцов для испытаний; 3 и 4 — припуски на обработку кромок.

ральному слою толщины листа, так как при изгибании металла наружные волокна удлиняются, а внутренние укорачиваются.

Размеры, наносимые на металл, должны отсчитываться по масштабной стальной линейке или рулетке, применение угольников не допускается, перпендикулярные линии можно наносить только путем геометрических построений. Разметка производится на ровном металлическом или деревянном стеллаже шириной не более 2 м и длиной не менее 5 м.

Разметка обечайки по раскройной карте показана на рис. 12-2.

Размеченный лист подвергается технической приемке, которая заключается в проверке нанесенных размеров на листе и замере разности диагоналей прямоугольной развертки обечайки. Разметка считается правильной при условии выполнения следующих допусков на разметку:

1) допуск для размеров до 10 м должен быть 0,5 мм, более 10 м — 1 мм;

2) допускаемая разность диагоналей прямоугольника развертки обечайки не должна превышать 1 мм. Линии отреза на листе намечаются керном. Нанесение других разметочных контуров на металл при помощи керна не допускается. Размеченные детали маркируют окраской.

Для получения качественных сварных соединений цилиндрическую часть кожуха аппарата иногда изготавливают по диаметру готовой крышки или днища, измеренному в холодном состоянии.

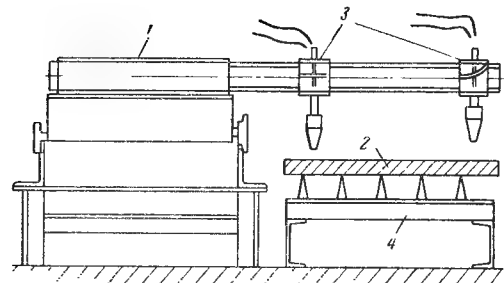


Рис. 12-3. Схема газорезательной машины.

1 — каретка автомата; 2 — лист; 3 — резаки; 4 — стол.

Резка. Механическую прямолинейную и криволинейную резку листов толщиной до 8 мм производят обычно роликовыми ножницами с двумя дисковыми ножами. Прямолинейная резка листов большей толщины производится на гильотинных ножницах или на пресс-ножницах. Газовая резка, широко применяемая при изготовлении теплообменных аппаратов, может производиться вручную, полуавтоматически и автоматически. Ручная газовая резка при серийном и массовом производстве почти полностью вытеснена газорезательными машинами-автоматами. Всесоюзным научно-исследовательским институтом автогенного машиностроения разработан и широко внедряется плазменно-дуговой метод резки металла. Магнитокопировальные машины снабжены плазматроном — ножом, «острием» которого служит плазма. Плазматроном можно резать все металлы, в том числе и легированную сталь толщиной 10 мм, со скоростью до 800 м/ч.

В процессе резки на таких машинах лист неподвижен, а резак или блок резаков, укрепленный на каретке станка с помощью специальной штанги, передвигается вдоль линии разреза (рис. 12-3). При установке на штанге нескольких резаков (в случае необходимости — под углом к плоскости листа) возможны одновременный раскрой металла для нескольких деталей и обработка скошенных кромок под сварку (рис. 10-2, 10-3 и 12-4).

Резка сортовой стали (круг, квадрат, полосы), фасонных профилей и труб производится на пресс-ножницах,

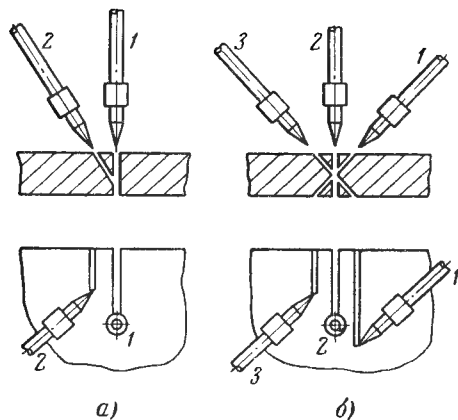


Рис. 12-4. Схема одновременной резки и обработки кромок блоками резачков.

а — двойным блоком; б — тройным блоком; 1, 2 и 3 — резачки.

приводными дисковыми пилами с зубьями, приводными ножовками или газовыми резачками.

Обработка кромок под сварку. Как продольные, так и кольцевые кромки обечаек, предназначенные для наложения сварного шва, обрабатывают для удаления повреждений, возникших в процессе резки листа. Обработка кромок производится механически или огневым способом. Механическая обработка выполняется на станках различных конструкций: продольно-строгальных, кромкострогальных, кромкообточных и фрезерных. Огневая обработка кромок производится только автоматической газовой или плазменно-дуговой резкой и совмещается обычно с резкой листа.

Изгибание листов для обечаек. Листы, предназначенные для изгибания, не должны иметь расщелений, трещин, плен и неметаллических включений. При изгибании обечаек для кожухов теплообменных аппаратов разница в размерах наружной и внутренней окружностей цилиндра допускается не более 5% внутренней окружности. Листы толщиной более $\frac{1}{40}$ внутреннего диаметра обечаек изгибают на вальцах в горячем состоянии, а после холодной гибки подвергают отжигу для снятия наклепа.

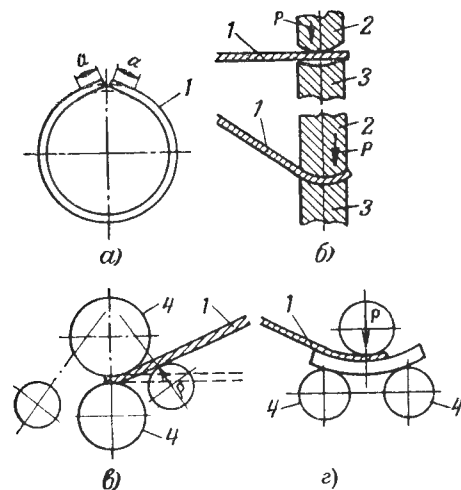


Рис. 12-5. Подводка кромок листа перед изгибанием.

а — заготовка обечайки без подводки кромок; б — подводка кромок на кромкогибочном прессе; в — подводка кромок на гибочных вальцах; г — подводка кромок на листогибочных вальцах с подкладным листом; 1 — лист; 2 — подвижный пуансон; 3 — неподвижная матрица; 4 — неподвижные валки; Р — действующая сила.

Перед изгибанием листов в цилиндр, корыто или конус необходимо произвести специальную операцию — подводку (подгибку) кромок. При вальцовке листов в цилиндр или конус края их на длине 100—150 мм остаются прямыми, и при стыковке таких концов поверхность сосуда получает острый излом в месте образования шва (рис. 12-5, а). В зависимости от толщины листа подводку кромок выполняют на кромкогибочных прессах (рис. 12-5, б), на гибочных вальцах (рис. 12-5, в) или вручную. Подводка кромок на листах толщиной более 6 мм может быть выполнена на листогибочных вальцах при помощи подкладных листов, изогнутых по соответствующему радиусу (рис. 12-5, г). Подводка кромок листов производится на длине а, равной половине расстояния между осями двух нижних валков листогибочной машины.

После подводки кромок листы поступают на вальцевание для придания им требуемой конфигурации. Валь-

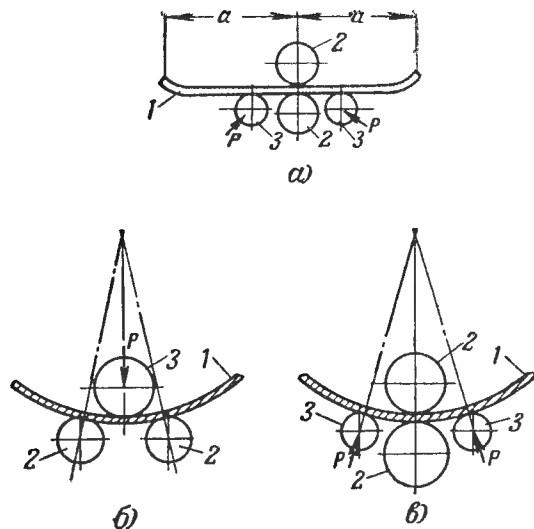


Рис. 12-6. Схема гибки листов на листогибочных вальцах.

а — положение листа перед гибкой; б — гибка в трехвалковых вальцах; в — гибка в четырехвалковых вальцах; 1 — лист; 2 — неподвижные валки; 3 — подвижные валки.

цевание производится на трех- или четырехвалковых горизонтальных вальцах (рис. 12-6). Перемещение листа в трехвалковых вальцах (рис. 12-6, б) в направлении вращения нижних ведущих валков происходит в результате трения листа о валок, вызванного упругостью листа. Верхний валок вращается под действием тангенциальной силы от листа. В четырехвалковых вальцах (рис. 12-6, в) лист перемещается под действием вращения сжимающих его больших валков — верхнего и нижнего. Изгибается лист под действием малых боковых нажимных валков. Вальцовка обечайки осуществляется в несколько возвратных проходов листа в валках до соприкосновения ее кромок.

При вальцовке обечайек возможны следующие дефекты: перекося кромок, перегиб на радиус меньше заданного, конусность, овальность и бочкообразность.

Сборка и сварка продольных стыков. Сборка продольных стыков после вальцовки листов про-

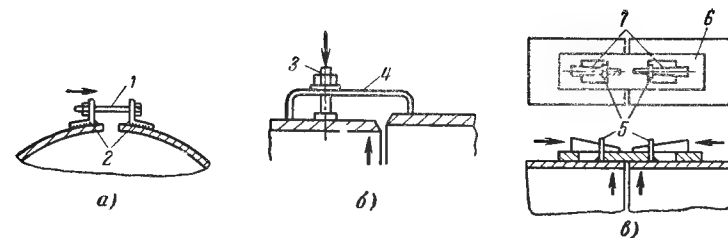


Рис. 12-7. Натяжные приспособления для сборки обечайки под сварку.

а — приваренные угольники с натяжным болтом; б — приваренный болт с натяжной скобой; в — приваренные ушки с натяжными клиньями и плитой; 1 — натяжной болт; 2 — угольники; 3 — болт; 4 — натяжная скоба; 5 — ушки; 6 — плита; 7 — натяжные клинья.

изводится на специальных сборочных стендах. Сборка цилиндрической части обечайки или корыт заключается в совмещении продольных кромок в соответствии с техническими требованиями к стыкам под сварку и в прихватке этих кромок посредством дуговой электросварки в нескольких местах (с длиной шва в 10—40 мм через каждые 200—400 мм). Обычно при сборке применяют натяжные (рис. 12-7) и кантовальные приспособления (рис. 12-8). Смещение продольных кромок листов одинаковой толщины не должно превышать 10% толщины стенки, но не более 3 мм. Допускаемая величина конусности обечайек приведена в табл. 12-2. Эллиптичность подготовленной к сварке обечайки в любом поперечном сечении не должна превышать 1% номинального диаметра.

После точной установки кромок и прихватки ручной электродуговой сваркой заготовка подается на автоматическую электродуговую сварку.

Сборка и сварка кольцевых стыков. В кожухах аппаратов, цилиндрическая часть которых со-

Таблица 12-2

Допускаемые отклонения обечайки на конусность

Диаметр обечайки, мм	Конусность, мм	Диаметр обечайки, мм	Конусность, мм
250—650	1	1 500—2 500	2,5
650—1 000	1,5	Более 2 500	3
1 000—1 500	2		

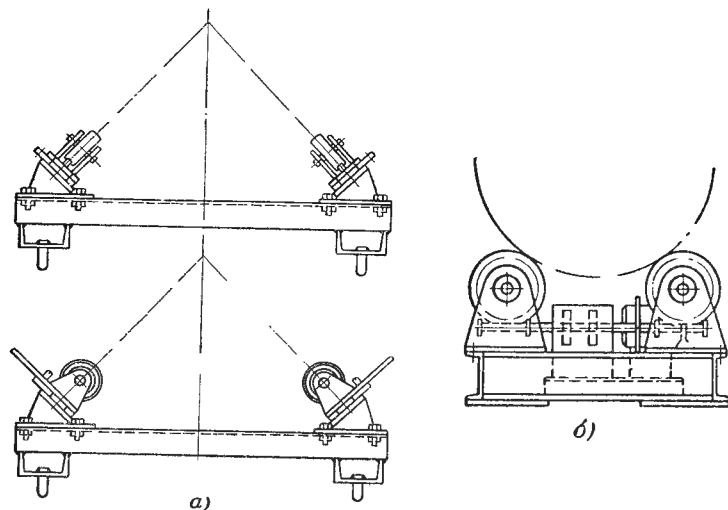


Рис. 12-8. Роликовые кантователи для сборки и сварки цилиндрических обечаек.

а — универсальный ручной кантователь для продольного перемещения и для вращения обечайки; *б* — кантователь с электроприводом.

стоит из нескольких обечаек, кольцевые стыки образуются при сборке обечаек между собой и при сборке цилиндрической части с крышками и днищами. Сборка под сварку кольцевых стыков аналогична сборке продольных стыков.

Некоторые конструктивные требования Госгортехнадзора к сварным теплообменникам. При сборке теплообменников продольные и поперечные швы должны быть только стыковыми. Приварка днищ к цилиндрической части внахлестку допускается в особых случаях при толщине стенки отбортованной части менее 16 мм.

При проектировании сварных стыков между элементами разной толщины необходимо предусматривать плавный переход от одного элемента к другому путем постепенного утонения более толстого элемента на длине, равной не менее четырехкратной разности толщин стыкуемых элементов. При разнице толщин соединяемых элементов не более 5 мм и толщине листа не менее 10 мм допускаются стыковые швы без предварительного утонения

толстой стенки, причем конфигурация швов должна обеспечивать плавный переход от толстого листа к тонкому.

Если нижняя часть горизонтальных аппаратов малодоступна для осмотра, продольные сварные швы должны быть расположены вне пределов 140° дуги нижней части корпуса аппарата.

Кольцевые (поперечные) сварные швы в горизонтальных сосудах следует располагать вне опор сосуда.

Штуцера и люки не разрешается устанавливать на продольных швах корпуса сосуда. Установка штуцеров и люков на кольцевых швах разрешается только в тех случаях, если установка штуцеров и люков на целом листе невозможна, и при условии укрепления отверстий.

При сварке двух обечаек стыковым швом смещение продольных швов в соседних обечайках должно быть не менее трех толщин свариваемых листов. Перекос продольных осей стыкуемых обечаек допускается не более 2 мм на 1 м. Следует иметь в виду, что кольцевое стыкование значительно сложнее продольного, так как практически всегда имеются некоторое различие диаметров обечаек и некоторая их овальность.

Вырезка отверстий. Для установки на аппарате штуцеров, бобышек и гильз, а также для заведения труб в готовых сваренных кожухах вырезают отверстия по разметке, выполненной на развертке кожуха. Отверстия небольшого диаметра сверлят на полный диаметр сверлом или фрезой. Отверстия больших диаметров рассверливают с предварительной центровкой малого диаметра (14—16 мм) на глубину 10—12 мм. При невозможности вырезки отверстий сверлами и фрезами применяют оправку с закрепленными в ней двумя резцами, установленными на расстоянии диаметра отверстия один от другого. Большие отверстия в листах вырезают газовой резкой или путем сверления отверстий диаметром 10—12 мм по размеченному контуру с последующей вырубкой перемычек между отверстиями пневматическим зубилом и окончательной очисткой кромок абразивным кругом.

После сверления и обработки отверстия в кожухе очищают от заусенцев с наружной и с внутренней сторон при помощи пневматических шлифовально-зачистных инструментов. Особенно тщательно выполняют отверстия под развальцовку труб.

К сварке сосудов, работающих под давлением, допускаются сварщики, имеющие удостоверение, выданное квалификационной комиссией после испытания сварщика в соответствии с «Правилами» Госгортехнадзора. Согласно этим «Правилам» сварные швы сосудов, работающих под давлением, подвергаются внешнему осмотру, механическим испытаниям на контрольных образцах, вырезанных из сварных соединений, просвечиванию гамма-лучами, исследованию макро- и микроструктуры и гидравлическому испытанию¹. Результаты испытаний занесутся в паспорт сосуда.

Внешнему осмотру подвергают все сварные швы. При внешнем осмотре обращают внимание на трещины в шве и в околошовной зоне, которые могут появиться из-за неравномерной усадки металла шва, а также вследствие образования мартенсита, имеющего несколько больший удельный объем, чем другие структурные составляющие стали. В сварном шве не должно быть наплывов, подрезов и пористости, а также отступлений от формы и размеров.

Механическим испытаниям подвергают образцы, вырезанные при сварке листов из контрольных пластин, а при сварке трубопроводов — из контрольных стыков. Механические испытания включают испытания на растяжение, на изгиб или сплющивание и в некоторых случаях на ударную вязкость. Результаты испытаний считаются неудовлетворительными, если показатели свойств хотя бы одного из образцов выходят более чем на 10% за допускаемые пределы.

Металлографические исследования производят в случаях, когда сосуд предназначен для работы при температуре выше 450°С или при давлении более 50 ат. Их производят также в тех случаях, когда сосуд изготавливается из легированной стали, склонной к подкалке. В процессе металлографического исследования выявляют макро- и микроскопические дефекты сварного шва: непровары, трещины, поры и шлаковые включения, а также определяют макро- и микроструктуру ме-

талла шва и зоны термического влияния сварки. Образец для металлографического исследования вырезают из контрольной пластины или из контрольного стыка поперек оси шва. Если металлографическое исследование дало неудовлетворительные результаты, сосуд к эксплуатации не допускается.

Сварные швы сосудов, работающих под давлением, должны проходить контроль рентгено- или гамма-просвечиванием. В зависимости от давления, под которым будет работать сосуд, и температуры рабочей среды «Правила» Госгортехнадзора устанавливают процент длины сварных швов, подлежащих просвечиванию. Длина участков швов, подлежащих просвечиванию, колеблется в пределах от 10 до 25%. Небольшие трещины и непровары просвечиванием не обнаруживаются, и поэтому для их выявления лучше проверять шов ультразвуком.

Все дефекты сварных швов, выходящие за допустимые пределы, вырубает, а места вырубки заваривают. После заварки дефектных мест сварной шов просвечивают.

Сварные сосуды, предназначенные для работы под давлением, подвергают испытаниям с целью проверки их прочности и плотности (подробно см. § 13-3).

Изготовление днищ и крышек

Сферические и эллиптические днища следует изготавливать по возможности из одного листа. Сферическая или эллиптическая форма дается заготовленным для днища листам штамповкой в горячем или в холодном состоянии. Лист, предназначенный для изготовления днища, предварительно размечают. Заготовка под днище (рис. 12-9) представляет собой круг, диаметр которого D_0 может быть определен по формуле

$$D_0 = L_{\text{раз}} + 2h - 2\delta + \Delta_{\text{пр}}, \quad (12-1)$$

где $L_{\text{раз}}$ — длина развертки эллипса, мм; h — высота цилиндрической части днища, мм; δ — толщина днища, мм; $\Delta_{\text{пр}}$ — припуск на обработку, мм.

Длину развертки эллипса $L_{\text{раз}}$ определяют по формуле

$$L_{\text{раз}} = \pi \frac{D_1 + d_1}{2} k, \quad (12-2)$$

¹ В настоящее время применяются также ультразвуковой, магнитографический, магнитный порошковый и цветной методы контроля сварных швов.

где k — коэффициент длины развертки эллипса, зависящий от соотношения осей эллипса $\frac{D-d}{D+d}$ (рис. 12-9), значения которого приведены ниже:

$\frac{D-d}{D+d}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
k	1,0025	1,0100	1,0226	1,0404	1,0635

Продолжение

$\frac{D-d}{D+d}$	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
k	1,0922	1,1267	1,1677	1,2155	1,2732

Эллиптические днища для сосудов и аппаратов можно подобрать по ГОСТ 6533-53.

Небольшие днища из листов толщиной до 4 мм штампуют на прессах в холодном состоянии (рис. 12-10, а). Большие днища из листов толщиной более 4 мм штампуют в горячем состоянии на гидравлических прессах мощностью 750—1 000 т и более. Заготовку нагревают предварительно до 1 050—1 100°С с таким расчетом, чтобы штамповка заканчивалась при 880—900°С (температура нормализации) с одного нагрева за один двойной ход пресса (рис. 12-10, б). Нагретую заготовку 4 укладывают концентрично на протяжное кольцо 5 штамп. Пуансон 6 штампа, имеющий форму днища и укрепленный на подвижной траверсе пресса, медленно опускается, постепенно протягивает заготовку через протяжное кольцо, формируя днище. По достижении пуансоном крайнего нижнего положения сбрасыватель 7 снимает с него готовое днище, и освобожденный пуансон перемещается в крайнее верхнее положение. Готовое

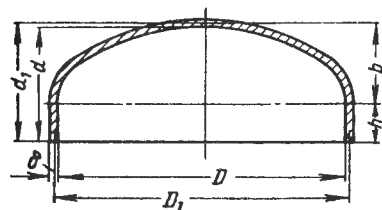


Рис. 12-9. Заготовка под днище.

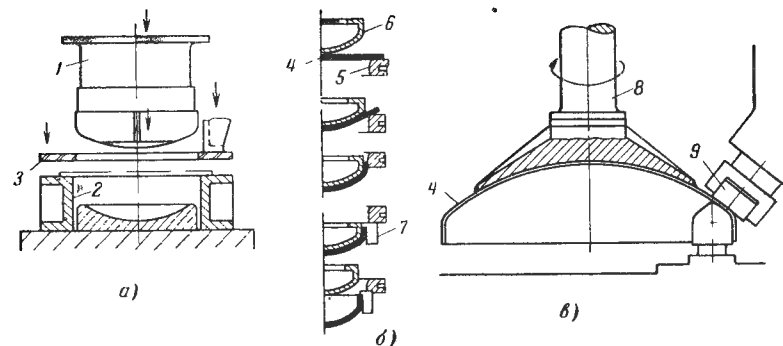


Рис. 12-10. Способы изготовления днищ.

а — штамповка в холодном состоянии; б — штамповка в горячем состоянии; а — обкатка на ротационных прессах; 1 — рабочий плунжер; 2 — стол; 3 — прижимное кольцо; 4 — заготовка; 5 — протяжное кольцо; 6 — пуансон; 7 — сбрасыватель; 8 — держатель; 9 — обжимный ролик.

днище извлекают из-под пресса краном или лебедкой.

При изготовлении днищ с лазом лазерный пуансон устанавливается на столе пресса и прошивает отверстие в днище, прежде чем оно приобретет конечную форму.

Наиболее совершенный способ изготовления выпуклых днищ — обкатка заготовок до необходимой степени кривизны на ротационных прессах с помощью прижимных роликов. На рис. 12-10, б представлена схема изготовления эллиптических и сферических днищ на ротационном прессе. Нагретая заготовка 4 вращается на вертикальном держателе 8, обжимается верхним наклонным роликом 9 и постепенно приобретает заданную форму с плавным переходом от сферы к цилиндрической части. Этим способом можно изготавливать днища диаметром от 1 300 до 5 500 мм при толщине листа от 10 до 140 мм. Штуцеры, смотровые окна, люки и лазы допускаются на днищах и крышках только при их размещении вне зоны переходной дуги и на расстоянии от крайней ее точки, равном толщине стенки днища или крышки или большем.

Применение аппаратов со сферическими днищами ограничено установками с огневым обогревом. Конические днища применяются в аппаратах, в которых происходит осаждение твердых частиц — шлама. В конических днищах сварной конструкции угол у вершины кону-

са выполняют обычно равным $60-80^\circ$ в соответствии с углом естественного угла откоса большинства сыпучих материалов.

Если днища подвержены механическому или химическому износу, рекомендуется выполнять на быстро изнашиваемую часть накладку, закрепляемую в нескольких местах приваркой.

После обмера и технической приемки отштампованных днищ с них удаляют излишний припуск по борту и затем механически обрабатывают. Механическая обработка заключается в протачивании торцевой цилиндрической части днища, обработке плоскости лаза и высверливании отверстий.

Патрубки (штуцера) диаметром более 200 мм приваривают к корпусу аппарата с помощью укрепляющих колец, а при диаметре до 200 мм — без них. Толщина кольца должна быть не меньше толщины обечайки. Толщина стенки патрубка определяется практически соображениями, учитывающими: возможность хорошей приварки патрубка к аппарату, дополнительные напряжения в патрубок из-за присоединяемых к нему трубопроводов, возможность использования патрубка при подъемах и транспортировке аппарата, достаточную прочность патрубка с учетом возможных ударов при транспортировке и монтаже аппарата, повышенную изнашиваемость от коррозии и эрозии стенок патрубка. Эти обстоятельства, не поддающиеся учету при расчете на прочность, обуславливают выбор толщины стенки патрубка не меньше расчетной, однако не меньше половины толщины стенки сосуда.

Отклонение центра патрубка на корпусе аппарата не должно превышать ± 10 мм от размеров по чертежу. Перекос поверхности уплотнения фланца должен быть не более 1 мм на каждые 100 мм наружного диаметра фланца, но не более 3 мм для фланца любого диаметра. Отклонение высоты патрубка над поверхностью аппарата не должно превышать ± 10 мм.

Кроме укрепления электросваркой, иногда патрубки укрепляют в стенках аппаратов посредством резьбового соединения, развальцовкой или затяжкой отбортованного патрубка гайкой.

Расположение люков и лазов должно обеспечивать удобство осмотра и ремонта аппарата. В теплообменной аппаратуре низкого и среднего давления при-

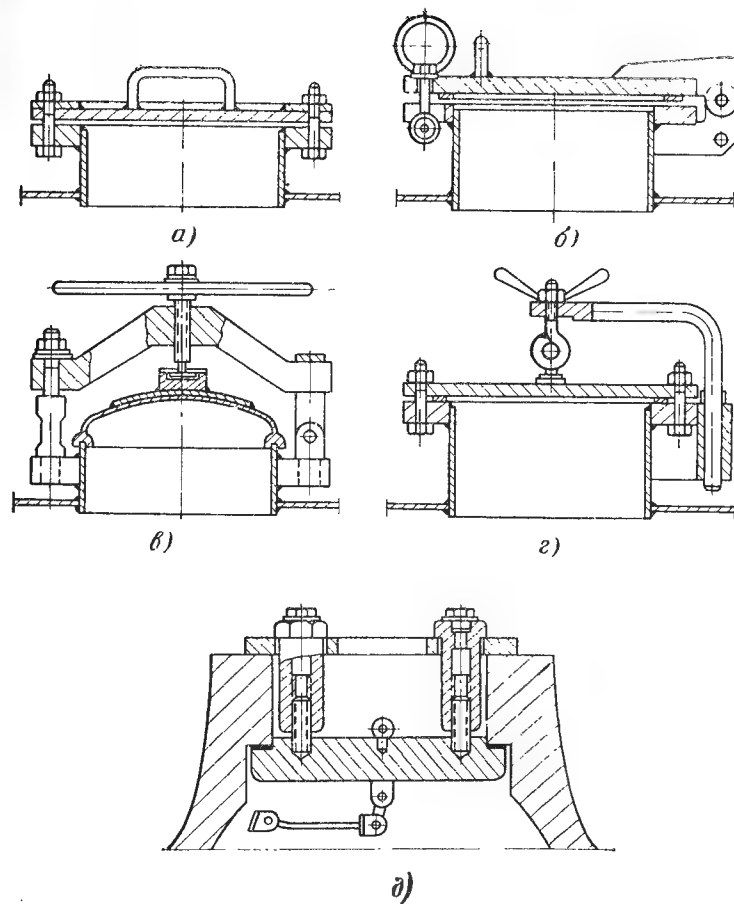


Рис. 12-11. Люки и лазы для теплообменников.

меняют люки в виде штуцера большого диаметра с плоской крышкой на болтах, с плоской крышкой на петле, со сферической крышкой на скобе или с плоской крышкой на кронштейнах (рис. 12-11, а—г). В теплообменниках высокого давления часто применяют люки с внутренней крышкой и натяжной скобой (рис. 12-11, д).

Смотровые окна в теплоиспользующих и реакционных аппаратах служат для наблюдения за уровнем жидкости, процессом кипения или ходом реакции. Смот-

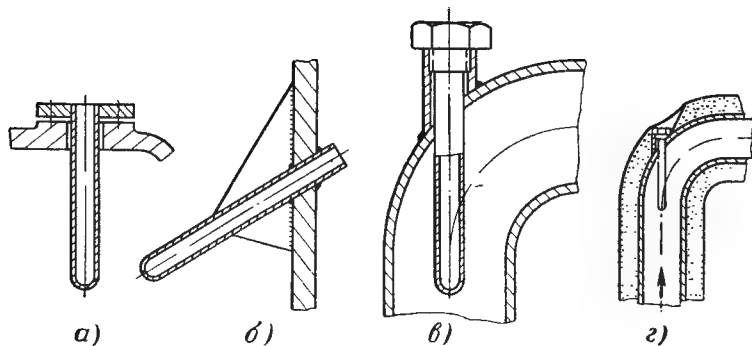


Рис. 12-12. Установка гильз для термометров.

ровые окна выполняют круглыми или прямоугольными. Диаметр стекол в круглых окнах — 60 и 165 мм при толщине 10 и 20 мм соответственно. Стекла устанавливают с помощью двух мягких прокладок между кольцами, одно из которых приваривается к стенке аппарата, а второе прижимается шпильками. Прямоугольные окна представляют собой рамку, в которую вкладывают на мягких прокладках стекло сечением 17×34 мм и длиной до 320 мм, имеющее продольные канавки, которые благодаря преломлению в них света облегчают наблюдение за уровнем жидкости. Часто для удобства наблюдения по высоте аппарата ставят несколько смотровых окон, причем одно из окон освещается электрической лампочкой.

Гильзы предназначены для установки в них стеклянных термометров или термпар. Их изготавливают из куска трубы с заваренным наглухо концом и присоединяют к корпусу аппарата при помощи фланцев (рис. 12-12, а) или приваркой (рис. 12-12, б). Иногда применяют латунные гильзы, ввертываемые в приваренный патрубок (рис. 12-12, в и г). Длинные гильзы выполняют из толстых труб или усиливают ребрами жесткости.

Лапы приваривают к цилиндрической части аппарата так, чтобы нижнюю его часть было удобно обслуживать. Опоры ставятся под аппаратом; при большом весе жидкости в сосуде они создают дополнительные напряжения в корпусе.

Горизонтальные сосуды можно устанавливать на опорах, поверхность которых должна охватывать сосуд по дуге не менее $\frac{1}{3}$ диаметра. Расстояние между краями сварных швов аппарата и местами приварки лап или опор должно быть не меньше толщины стенки аппарата.

Линзовые компенсаторы

В конструкциях жестких теплообменников часто применяют тарельчатые (линзовые) компенсаторы, свариваемые между обечайками кожуха (рис. 12-13). Линза тарельчатого компенсатора изготавливается из двух половин, соединяемых электросваркой. Кольцеобразные заготовки, предназначенные для изготовления полулинз, вырезают из стального листа. При наличии пресса достаточной мощности половинки линз могут быть выполнены из заготовок путем холодной штамповки. При отсутствии пресса штамповка может быть заменена отбортовкой (обкаткой) кромок на карусельном станке.

В практике встречаются торцовый и трапециевидный компенсаторы (рис. 12-14).

Фланцы

Фланцевые соединения должны быть прочными и обеспечивать герметичность соединения. Типы и размеры фланцев подбирают по ГОСТ, перечисленным в табл. 12-3. Выбор типа фланцевого соединения (рис. 12-15) зависит от условий работы аппарата, давления, агрессивности среды, условий монтажа и технологических возможностей изготовления фланцев. В аппаратах с рабочим давлением до 100 ат, а также в работающих с ядовитыми и легковоспламеняющимися средами, применяют фланцы усиленного типа, в которых на поверхностях уплотнения имеются выступы и впадины или шипы и пазы.

Фланцы небольшого диаметра изготавливают обычно из листовой стали, фланцы диаметром более 200 мм — из полосового проката путем гибки в горячем состоянии.

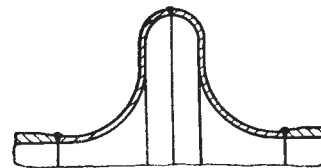


Рис. 12-13. Тарельчатый линзовый компенсатор.

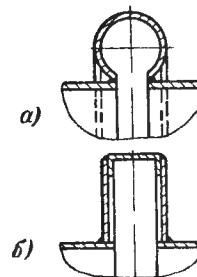


Рис. 12-14. Торцовый (а) и трапециевидный (б) линзовые компенсаторы.

Перечень стандартов на фланцевые соединения
для трубопроводов и аппаратов

Номер стандарта	Содержание стандарта
ГОСТ 1234-67	Присоединительные размеры для фланцев арматуры, соединительных частей и трубопроводов
ГОСТ 1235-67	Фланцы чугунные литые для давлений условных $P_y = 2,5—25 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 12821-67	Фланцы стальные литые для давлений условных $P_y = 16—200 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 1245-67	Фланцы с шейкой на резьбе для давлений условных $P_y = 2,5—16 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 1255-67	Фланцы плоские приварные для давлений условных $P_y = 2,5—25 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 12830-67	Фланцы приварные встык для давлений условных $P_y = 2,5—200 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 1265-67	Фланцы свободные с буртом для давлений условных $P_y = 40—100 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 1268-67	Фланцы свободные на приварном кольце для давлений условных $P_y = 2,5—25 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 1272-67	Фланцы свободные на отбортованной трубе для давлений условных $P_y = 2,5—6 \text{ кгс/см}^2$
ГОСТ 6973-59	Заглушки фланцевые

При установке фланцев на корпус или крышку аппарата проверяют их перпендикулярность к оси обечайки по наружным кромкам обработанных поверхностей. Допускаются следующие отклонения перпендикулярности плоскости фланцев относительно оси аппарата:

Диаметр фланца, мм	Допустимое отклонение, мм
до 500	1
500—1 500	1,5
1 500—2 000	2
Более 2 000	3

Шаг болтов на фланцах выбирают не менее $3d$ и не более $5d$ (d — диаметр болта). Число болтов должно быть кратным четырем, что обеспечивает равномерность сжатия прокладки. Плотность и прочность фланцевого соединения ухудшаются как при слишком слабой, так и при слишком сильной затяжке болтов и шпилек. При слабой затяжке ослабляется плотность соединения; при слишком сильной затяжке ускоряется разрушение прокладок и может произойти обрыв болтов и шпилек. Под гайки рекомендуется ставить шайбы.

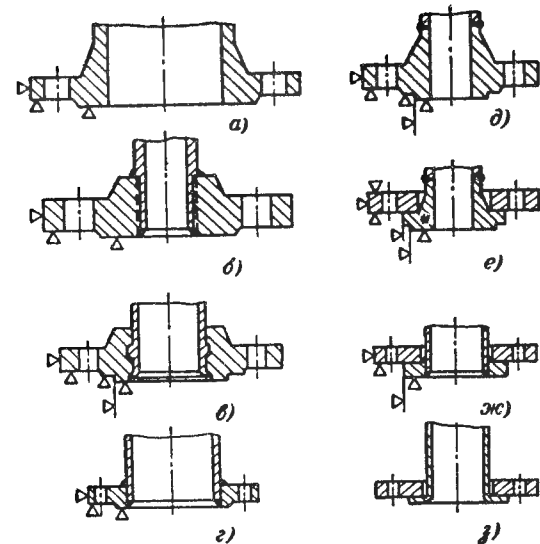


Рис. 12-15. Типы фланцев.

а — чугунные и стальные литые; б — стальные с шейкой на резьбе; в — стальные с шейкой под развальцовку; г — стальные плоские приварные; д — литые приварные встык; е — стальные свободные с буртом; ж — стальные свободные на приварном кольце; з — стальные свободные на отбортованной трубе.

Термическая обработка

В элементах аппаратов и сосудов, изготовленных с помощью сварки, вследствие усадки швов возникают термические напряжения: большие в кольцевых и меньшие в продольных швах. По «Правилам» Госгортехнадзора сосуда, изготовленные при помощи сварки из малоуглеродистой стали при толщине стенки более 25 мм или из легированной стали при толщине стенки более 10 мм, подвергаются обязательной термической обработке — отпуску для снятия напряжений.

Изготовление и сборка трубчатки

Трубчатка собирается из трубных решеток (досок) и труб. В теплообменниках некоторых конструкций трубчатка включают перегородки (продольные или поперечные) и каркасы, служащие основой для сборки трубной системы.

Трубные решетки изготовляют из листовой стали, в особых случаях — из меди или других металлов и сплавов. Отобранные по качеству и размерам листы правят на листопрямых вальцах. На выправленных листах размечают контуры для вырезки круга и обработки поверхности под фланцы. Вырезку заготовок для решеток производят автоматической или полуавтоматической газовой или плазменно-дуговой резкой. Вырезанные заготовки обрабатывают по торцу круга и по плоскости прокладки. При изготовлении трубной решетки для многоходового теплообменника чистовой обработке подвергают либо всю ее поверхность, что необходимо для герметичности соединения решетки с крышкой, либо под перегородками крышки выбирается канавка для прокладки уплотнительного материала (см. рис. 10-7, а).

После наружной обработки заготовку размечают под сверление отверстий для труб, болтовых соединений и анкерных связей. В зависимости от размещения труб отверстия в решетках сверлят по окружностям или по ромбической сетке.

Для обеспечения соосности и цилиндричности отверстий в трубных решетках и в промежуточных перегородках аппарата отверстия сверлят по кондуктору или пакетом. При сверлении пакетом размечают одну заготовку, после чего решетки и перегородки собирают в пакет и зажимают струбцинами. На радиально-сверлильном станке производят сначала центровку (сверлом малого диаметра) и далее сверление отверстий сверлом проходного диаметра. Диаметр отверстий должен превышать наружный диаметр труб не более чем на 1,5%.

Заготовку труб производят перед механической обработкой. Трубы отбирают по диаметру, длине и качеству. Испытывают трубы на выборку — по несколько штук из каждой партии (до 10%): на растяжение, на загиб и на внутреннее давление — в соответствии с ГОСТ.

Для сборки U- и W-образных теплообменников трубы изгибают по шаблонам на трубогибных станках с электромеханическим, гидравлическим или ручным приводом. В зависимости от диаметра и радиусагиба трубы гнут в холодном или в горячем состоянии, пустыми или для уменьшения овалности в местегиба набитыми сухим песком. Подготовленные трубы обрезают либо на трубоотрезных или токарных станках, либо дисковыми

пилами или абразивными кругами. Перед заведением труб в трубную решетку проверяют зачистку их концов и состояние внешней и внутренней поверхностей. При сборке трубчатки прямые трубы вставляют в отверстие одной решетки и прогоняют по всей длине до другой трубной решетки; U- и W-образные трубы вставляют в отверстия решетки с внутренней стороны трубчатки обоими концами одновременно.

В решетках трубы закрепляют различными способами: развальцовкой, заваркой, запайкой, с помощью втулки на резьбе или с помощью сальников. В теплообменниках широко применяют закрепление труб развальцовкой, так как при этом способе закрепления можно легко заменять трубы в случае появления в них дефектов. Заварка труб применяется в тех случаях, когда в теплообменнике отсутствуют условия для коррозии или требуется особая герметичность. Заварку применяют также при установке трудновальцуемых толстостенных труб или при высоких температурах эксплуатации (500°С и выше). Имеется положительный опыт замены ручной заварки труб полуавтоматической с помощью сварочного пистолета. Для укрепления труб из цветных металлов применяют запаивание. Однако вследствие местных перегревов при этом коробится трубная решетка. Кроме того, прочность крепления при пайке уступает другим способам крепления труб в трубной решетке.

Развальцовка является наиболее распространенным в аппаратостроении способом крепления труб.

Под прочностью развальцовки понимается максимальная осевая сила, выраженная в килограммах на 1 см наружного периметра трубы, которая способна вырвать трубу из гнезда. Если на каждую трубу наружным диаметром d_n (см) приходится площадь трубной решетки f (см²), то при рабочем давлении P (кгс/см²) на погонный сантиметр наружного периметра трубы без учета термических напряжений приходится сила

$$\sigma = \frac{Pf}{\pi d_n}, \text{ кгс/см.} \quad (12-3)$$

Для обеспечения достаточной прочности развальцовки величина σ не должна превышать:

40 кгс/см для концов труб, развальцованных в гладких цилиндрических отверстиях;

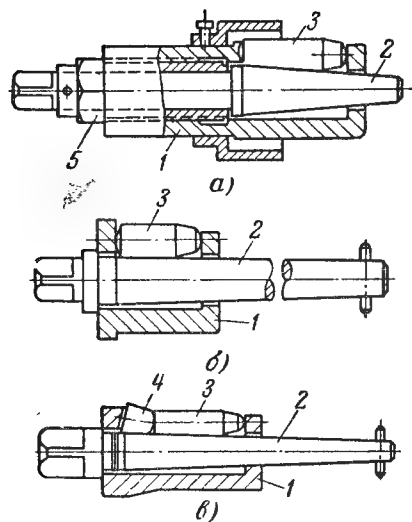


Рис. 12-16. Конструкции вальцовок.

а — винтовая; б — самоподающая простая; в — самоподающая с бортовочными роликами; 1 — корпус; 2 — конус (веретено); 3 — ролики вальцовочные; 4 — ролики бортовочные; 5 — нажимной винт.

шетки путем раскатки их роликами вальцовки под действием вращаемого конуса (рис. 12-16).

Вальцовки бывают ручные, с пневматическим приводом или с электрическим приводом с гибким валом. По способу подачи конуса они разделяются на винтовые и самоподающие. Винтовые вальцовки (рис. 12-16, а) просты в установке и удобны. Однако подача конуса осуществляется в них с помощью нажимного винта периодически, по мере ослабления давления роликов на стенку трубы. Вследствие периодичности действия роликов и уменьшения их давления по мере раскатки винтовые вальцовки редко применяют при массовом укреплении труб в решетках.

Вследствие некоторого перекоса окон для роликов относительно оси конуса самоподающие вальцовки (рис. 12-16, б и в) как бы «звинчиваются» в трубу при вращении конуса: процесс развальцовки самоподающим инструментом протекает непрерывно при возрастающем давлении роликов на трубу, что обеспечивает высокое

50 кгс/см для концов труб, развальцованных в гладких и цилиндрических отверстиях с последующей отбортовкой труб с одного конца;

70 кгс/см для труб, развальцованных в гладких цилиндрических отверстиях и отбортованных с двух концов.

Под плотностью развальцовки понимается способность соединения сопротивляться гидравлическому давлению воды, заполняющей трубы, выраженному в кгс/см².

Сущность развальцовки заключается в холодной раздаче труб в гнездах трубной

качество и быстроту сборки. На рис. 12-16, в показана самоподающая вальцовка с бортовочными роликами. При вращении конуса под действием осевой силы ролики вращаются и передают радиальное давление на стенку трубы. Труба раздается и приходит в соприкосновение со стенкой очка. При дальнейшем вращении конуса давление от роликов передается через стенку трубы на стенку очка. Металл трубы, зажатый между роликами и стенкой очка, деформируется и заполняет промежутки между поверхностями соприкосновения, чем достигается плотность соединения. В процессе развальцовки металл трубы испытывает остаточную деформацию, а прилегающий к трубе металл решетки — упругую. Упругая деформация очка и остаточная деформация трубы создают силы трения между поверхностями, обеспечивающие необходимую прочность соединения.

Для высокого качества развальцовки необходимы следующие условия:

1) металл труб должен быть пластичнее и мягче металла трубной решетки, а последний в результате вальцовки не должен воспринимать остаточной деформации;

2) начальная величина зазора между трубой и стенкой очка должна быть минимальной. Учитывая возможные отступления в размерах труб и отверстий для них, иногда трубы подбирают по очкам индивидуально;

3) поверхности концов труб и стенок очка должны быть чисто обработанными, свободными от масла, ржавчины и других налетов и загрязнений;

4) длина конца трубы, выступающего над трубной решеткой, не должна превышать 5—8 мм для труб диаметром до 32 мм и 10—12 мм для труб диаметром более 32 мм. Отбортовка конца трубы (образование колокольчика) увеличивает прочность и плотность развальцовки;

5) кольцевые канавки на поверхности очка увеличивают прочность развальцовки на 50—70%. Однако изготовление канавок в очке значительно удорожает стоимость работ, и поэтому их выполняют только в особых случаях;

6) полная раздача трубы должна быть достигнута за четыре-пять оборотов корпуса вальцовки;

7) машинная развальцовка обеспечивает большую плотность и прочность, чем ручная;

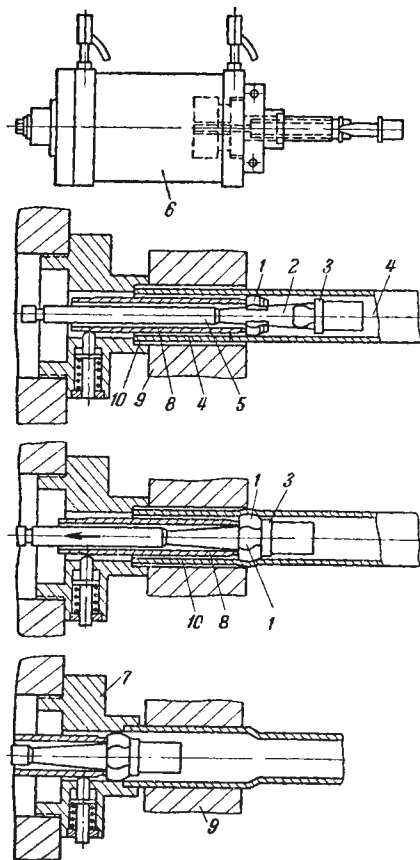


Рис. 12-17. Гидравлическая вальцовка.

1 — подвижные сухари; 2 — конусная часть штока; 3 — упорный болт штока; 4 — труба; 5 — шток; 6 — гидродвигатель; 7 — упорная крышка гидродвигателя; 8 — направляющая втулка; 9 — трубная решетка; 10 — зазор между трубой и трубной решеткой.

8) толщина трубной решетки не должна быть меньше определенного предела, в противном случае прочность вальцовочного соединения снижается.

При развальцовке труб следует следить за тем, чтобы не возникали:

1) недовальцовка, определяемая отсутствием заметного на ощупь характерного перехода, между развальцованной и неразвальцованной частями трубы;

2) перевальцовка, которая определяется по чрезмерной длине колокольчика, а также по раздутости трубы на выходе за трубную решетку;

3) однобокая вальцовка — одностороннее выпучивание трубы на выходе из очка;

4) шероховатость развальцованной части трубы вследствие изношенности роликов вальцовки;

5) подрез трубы по кромкам очка трубной решетки;

6) трещины или разрывы в вальцованной части трубы или в колокольчике.

Дефекты развальцовки следует устранить повторной подвальцовкой (однако не более 2 раз), а в случае необходимости — заменить трубы.

Для укрепления труб развальцовкой применяют также гидравлическую вальцовку (рис. 12-17). Она состоит из направляющей втулки, конического штока с подвижными сухарями и гидравлического двигателя с масляным насосом. Перед началом операции вальцовку вместе с сухарями и направляющей втулкой вводят внутрь трубы. При включении гидравлического двигателя сухари раздвигаются и раздают трубу на величину, обеспечивающую плотное закрепление ее в очке. При таком способе вальцовки на трубу не воздействуют осевые силы, и поэтому отпадает необходимость в раздаче под колокольчик выступающего конца трубы. Масляный насос с баком для масла монтируется на тележке, что делает все устройство компактным и портативным. Гидравлической вальцовкой можно укреплять трубы диаметром от 18 до 150 мм.

Изготовление теплообменников для сверхвысоких давлений

В современной технике широко применяют теплообменные аппараты для работы при высоких и сверхвысоких давлениях. В тепловой энергетике получили развитие котельные агрегаты, паровые турбины и вспомогательное оборудование на давления более 200 ат и температуры выше 500°С. В настоящее время химическое оборудование работает при давлениях до 6000 ат. Толщина стенок некоторых аппаратов достигает 300 мм.

Котельные барабаны, теплообменники и автоклавы со стенками толщиной 70 мм и более изготавливают сварными из листового проката, ковано-сварными цельноковаными. Технология изготовления цельносварных толстостенных аппаратов не отличается от технологии изготовления обычных теплообменников.

Цельнокованные сосуды изготавливают из одного слитка, вес которого определяют с учетом отходов при ковке и механической обработке. При температуре около 700—800°С слитки подают в кузнечно-прессовый цех, где их дополнительно нагревают до 1200—1250°С. Ковку заканчивают при температуре не ниже 800°С. Ковку толстостенных цилиндрических сосудов производится на гидравлических прессах мощностью до 15 тыс. т. После первого нагрева до 1250°С слиток округляют, обрубая его концы и осадкой увеличивают в диаметре. После второго нагрева заготовку подают под пресс для прошивки отверстия строго по центру. Полученную кольцевую заготовку снова нагревают до 1250°С и в несколько приемов расковывают на оправках до получения поковки нужных длины и диаметра. Если днища сосуда отковываются заодно с цилиндром, то концы поковки должны иметь утолщения. Послековки заготовку подвергают

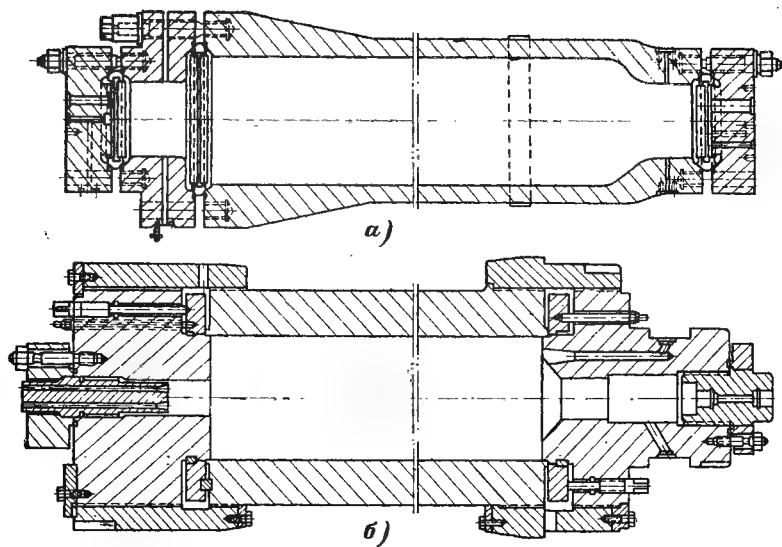


Рис. 12-18. Конвертеры для синтеза аммиака при давлениях 350 ат (а) и 800 ат (б).

высокому отпуску при 600—700°С для снятия напряжений и смягчения металла перед механической обработкой. Механическая обработка заготовки заключается в обточке внутренней и внешней поверхностей, а также в обработке концов под крышки лазов. Кроме того, с обоих концов заготовки отрезают по кольцу, из которых вырезают образцы для испытания металла.

Обечайки ковано-сварных сосудов изготавливают по той же технологии, что и цельнокованные сосуды, с последующей сваркой обечайек поперечными (кольцевыми) швами. Обычно ковано-сварные сосуды сваривают из нескольких отдельно откованных частей.

Целые сосуды из одного куска металла изготавливают также методом раскатки, основанным на оттяжке нагретого до 1000—1100°С металла. Откованную и проштампованную заготовку раскатывают на радиально-валцовочном стане несколькими парами радиально расположенных роликов. Широкого распространения этот способ изготовления толстостенных обечайек не получил из-за сложности оборудования и высокой стоимости обработки.

На рис. 12-18 показаны конвертеры для синтеза аммиака при давлениях 350 и 800 ат. Корпус конвертера выполнен цельнокованным; фланцы отковывают вместе с корпусом или навинчивают в горячем состоянии на цельнокованный кожух. Концы корпуса закрыты коваными крышками, крепящимися с помощью болтов. Фланцы уплотняют мягкой листовой медью или стальными линзовыми прокладками. Корпус конвертера, фланцы, нарезные кольца, крышки, болты и гайки изготавливают из легированных сталей.

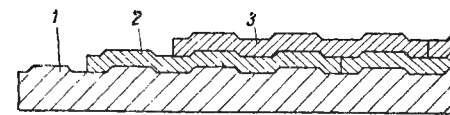


Рис. 12-19. Стенка витого сосуда.

1 — труба-сердечник; 2 и 3 — профилированная лента первого и второго слоя.

В химической промышленности применяют металлические сосуды высокого давления с двухслойными и многослойными стенками с предварительным напряжением металла у внутренней стенки сосуда, что уменьшает вес конструкций. Предварительное напряжение материала у внутренней стенки сосуда создают двумя способами. Первый способ состоит в том, что на сердечник, представляющий собой трубу, накладывают тонкие стальные листы полуцилиндрической формы и сваривают их по образующим цилиндра. Так сваривают несколько слоев. Сжатие при охлаждении сварных швов вызывает необходимое напряжение. Второй способ состоит в том, что на сердечник, выполненный в виде трубы, наматывают по спирали профилированную стальную ленту шириной 50—80 мм и толщиной 5—8 мм до необходимой толщины стенки сосуда. Шаг навивки равен ширине ленты. Стальные полосы профилируют прокаткой, причем профиль имеет три выступа и три впадины, как это показано на рис. 12-19. Витки последующего слоя сдвигают относительно витков предыдущего слоя на $\frac{1}{3}$ ширины ленты, чем достигается полное перекрытие стыков. Так же выполняют фланцы сосуда, применяя полосы со скошенной кромкой. По окончании навивки на концы сосуда насаживают бандажные кольца.

При отношении наружного диаметра к внутреннему до 1,2 и давлении до 300 ат кованые и витые сосуды примерно равноценны; при отношении диаметров от 1,2 до 2 витые сосуды выдерживают в 1,5 раза большее давление, чем кованые. Отходы при изготовлении витых сосудов составляют 5%, при производстве кованых сосудов — 50%.

Затворы аппаратов высокого давления делятся на две группы: без самоуплотнения, когда действием давления среды уменьшается давление между поверхностями уплотнения, и с самоуплотнением, когда действие давления среды способствует лучшему прилеганию поверхностей уплотнения. В конструкции самоуплот-

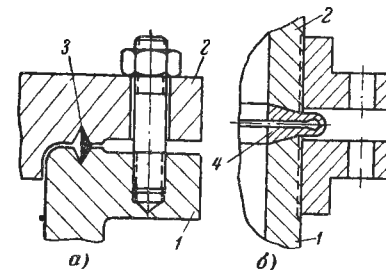


Рис. 12-20. Затворы аппаратов высокого давления с самоуплотнением.

а — с кольцом; б — с линзой.

нящихся затворов предусматривается уменьшение предварительного напряжения болтов в момент сборки и использование внутреннего давления среды для уплотнения мест разъема. На рис. 12-20 показаны уплотнения с кольцом треугольного сечения и с самоуплотняющейся линзой, основанные на пластической деформации, происходящей под действием силы стягивающих болтов и внутреннего давления среды. Недостаток этих затворов состоит в большой затрате времени на закрывание аппарата и в необходимости больших сил для затягивания болтов.

Имеются конструкции самоуплотняющихся затворов, в которых для быстроты закрывания аппарата и снижения величины необходимой стягивающей силы используются высокая эластичность прокладочного материала, уменьшение площади уплотняющей поверхности, увеличение отношения силы в уплотнении к стягивающей силе путем выбора надлежащей конфигурации уплотняемой поверхности, действие давления внутри аппарата на уплотняющие детали затвора [Л. 7].

12-4. УГЛЕГРАФИТОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Для работы с коррозионноактивными веществами наряду с металлическими применяют теплообменники из неметаллических материалов [Л. 41]. Так, из пропитанного графита и графитопластов изготавливают кожухотрубчатые, пластинчатые и блочные теплообменники, теплообменники «труба в трубе», оросительные холодильники и абсорберы, печи синтеза хлористого водорода, выпарные аппараты.

Коэффициент теплопередачи теплообменников из пропитанного графита равен практически таковому стальных теплообменников. Теплообменники из графитопластов характеризуются более низким коэффициентом теплопередачи. Все теплообменники из углеграфитовых материалов работают при сравнительно низких температурах ($150-170^{\circ}\text{C}$) и давлениях (от 2 до $5-10\text{ ат}$). Теплообменники с двойными трубами и кожухотрубчатые изготавливают поверхностью до $200-250\text{ м}^2$, а пластинчатые — до 20 м^2 .

Кожухотрубчатые теплообменники, изготовленные из углеграфитовых материалов, аналогичны по конструкции теплообменникам из металлических материалов и очень компактны. В этом их существенное преимущество перед теплообменниками, выполнен-

ными из других неметаллических материалов. Различают два типа кожухотрубчатых теплообменников из углеграфитовых материалов.

1. Теплообменники, в которых из углеграфитового материала выполнены трубы, трубные решетки и крышки, а кожух — из стали. В этом случае предусматривают возможность свободного теплового расширения графитовых и стальных элементов, коэффициент рас-

ширения которых различен (обычно сальниковые устройства или «плавающая головка»). Такие теплообменники пригодны для процессов, в которых одна из сред коррозионноактивна, а другая — нейтральна, например соляная кислота и водяной пар.

2. Теплообменники, полностью изготовленные из углеграфитовых материалов. В этом случае применение компенсационных устройств не обязательно, и обе участвующие в теплообмене среды могут быть коррозионноактивными.

На рис. 12-21, а и б показаны графитовые кожухотрубчатые теплообменники со стальным кожухом и плавающей головкой. Эти конструкции применяют при необходимости изготовления теплообменников с большой поверхностью теплообмена или в случае работы аппарата под вакуумом. Длина труб в теплообменнике достигает 4 м, длина теплообменника 5,2 м, диаметр 1200 мм, поверхность теплообмена — до 215 м^2 , максимально допустимое давление в аппарате — до 5 ат.

На рис. 12-21, в показан графитовый кожухотрубчатый теплообменник, работающий по принципу падающей пленки. Аппарат состоит из нескольких трубчатых элементов с поверхностью теплообмена $1,5\text{ м}^2$ каждый, устанавливаемых один над другим. Число элементов в одном аппарате принимают от 2 до 10. В верхней части каждого элемента на концы труб устанавливают колпачки с прорезями, обеспечивающие образование пленки из жидко-

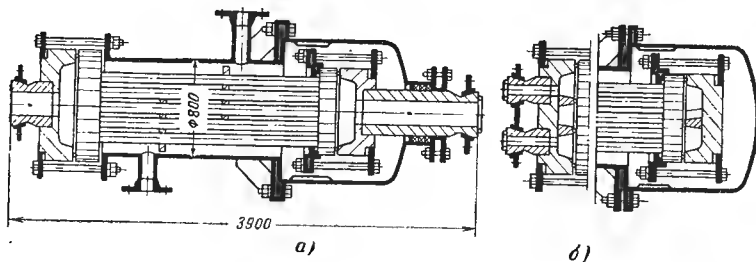
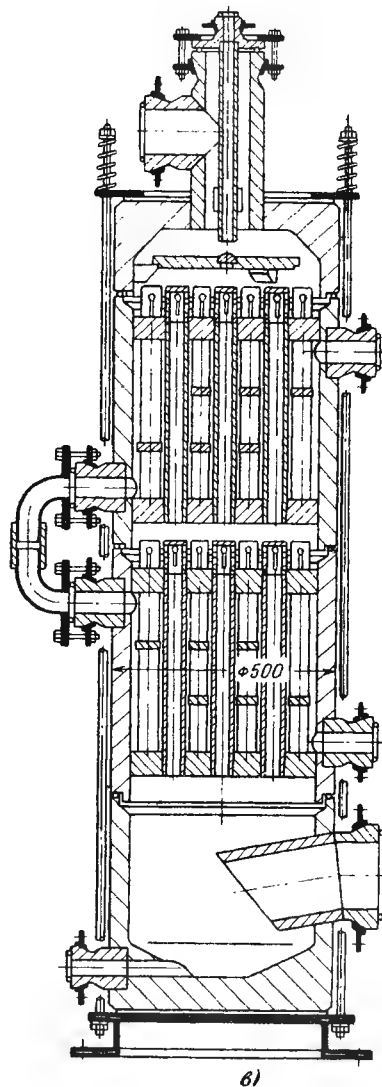


Рис. 12-21. Кожухотрубчатые графитовые теплообменники.

а — одноходовой с металлическим кожухом; б — двухходовой с металлическим кожухом; в — кожухотрубчатый с графитовым кожухом.



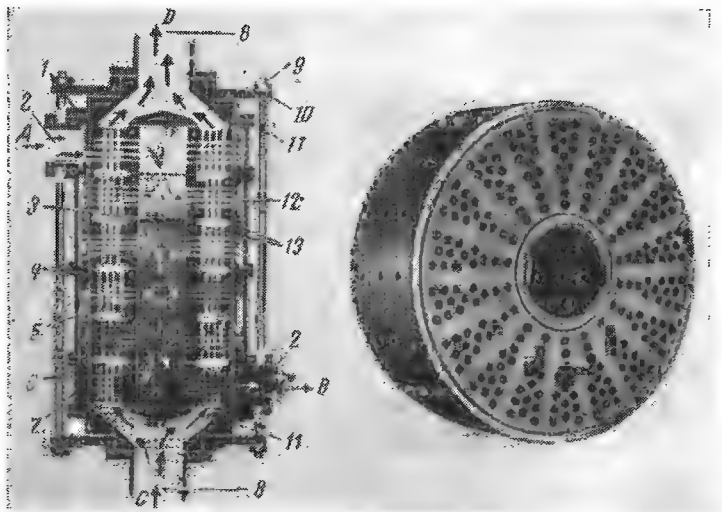


Рис. 12-22. Графитовый теплообменник из круглых блоков.

a — общий вид; *б* — графитовый блок; 1, 9 — стальные стяжки; 2, 8 — графитовые штуцеры; 3, 4 — графитовые прокладки; 5 — стальной кожух; 6, 7, 11, 12, 13 — графитовые элементы; 10 — графолитовые крышки.

сти, стекающей по внутренней поверхности трубок. Жидкость движется сверху вниз, проходя последовательно через все элементы аппарата. Второй теплоноситель поступает в межтрубное пространство последнего элемента и переходит из одного элемента в другой по соединительным каналам. Тепловая компенсация в аппарате осуществляется с помощью металлических пружин, установленных под гайками металлических связей, стягивающих верхнюю и нижнюю крышки.

Блочный теплообменник из цилиндрических блоков показан на рис. 12-22. В блоках просверлены каналы малого диаметра (от 8 до 18 мм) в осевом и радиальном направлениях, в центре блока — отверстие большого диаметра по его оси. Теплообменник собирают из группы блоков, число которых зависит от величины поверхности теплообмена. Блоки устанавливают один на другой с кольцевыми прокладками между ними, снаружи надевают стальной кожух, сверху и снизу устанавливают крышки из «графолита» и чугунные плиты, после чего весь комплект соединяют с помощью стальных стяжек, проходящих через отверстия в верхней и нижней чугунных плитах.

Жидкость, подаваемая через штуцер *A* в наружном кожухе, проходит по радиальным каналам первого блока в центральный осевой канал, а из него по радиальным каналам второго блока в наружный кольцевой канал и далее по радиальным каналам третьего блока в центральный осевой канал и далее вплоть до выходного штуцера. Через штуцер *C* по осевым каналам движется второй кор-

розионно активный теплоноситель, проходящий прямолинейно и последовательно через все блоки.

К преимуществам этих аппаратов относится сравнительная простота их изготовления. Аппараты могут быть собраны без применения замочков и клеев, они прочны и надежны в работе, легко разбираются и обеспечивают интенсивный теплообмен. Блочные теплообменники изготовляют из цилиндрических и прямоугольных блоков. Давление в аппарате допускается в пределах до 6 ат, число блоков — от 2 до 20. Поверхность теплообмена аппарата может достигнуть 42—50 м².

Если обе жидкости, участвующие в теплообмене, коррозионно-активны, наружный стальной кожух гуммируют или защищают другим материалом с внутренней стороны. Наружный кожух также можно изготовлять из графита.

12-5. УПЛОТНЕНИЕ РЕЗЬБОВЫХ, ФЛАНЦЕВЫХ И САЛЬНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Плотные разъемные сочленения частей сосудов выполняются с помощью резьбовых, фланцевых с прокладкой и сальниковых с набивкой соединений. Самым распространенным из них в теплообменных аппаратах является фланцевое соединение.

Муфтовые соединения наиболее часто применяют для соединения труб. Они состоят из нарезанной муфты и контргайки. На конце одной из труб нарезают длинную резьбу («сгон»), на которую сначала навинчивают контргайку и муфту. Затем стыкуют концы двух труб и муфту перегоняют на другую трубу до упора в последних витках ее резьбы и поджимают контргайкой. Плотность резьбового (обычно с трубной резьбой) соединения достигается посредством льняной пряжи, намотанной на резьбу и смазанной свинцовыми белилами, суриком или другой масляной краской. Сами по себе обычные трубные и метрические резьбы, без дополнительных уплотняющих материалов, плотности не обеспечивают. Только коническая резьба по ГОСТ 6211-52 обеспечивает плотность соединения без уплотнительных материалов. Резьбовые муфтовые соединения применяют в трубопроводах низкого давления (не более 5—6 ат) для воды, пара и других неагрессивных сред.

Герметичность разъемных фланцевых соединений достигается путем применения прокладок, изготовляемых вырубкой или вырезкой в виде колец из картона, парусины, кожи, фибры, паранита, резины, пластмасс, металлов и других материалов. Выбор материала зависит от свойств и параметров уплотняемой среды и

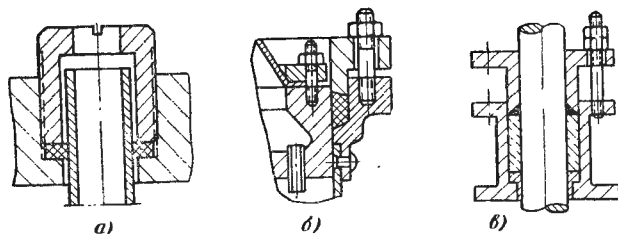


Рис. 12-23. Сальниковые уплотнения.

a — труба в грубой решетке; *б* — трубная решетка в корпусе;
в — шток в вентиле.

Прокладки для фланцевых соединений теплообменников
и трубопроводов низкого, среднего и высокого давлений

Прокладочные материалы	Предельное рабочее давление, ат	Предельная температура, °C	Толщина проклад-ки, мм	Примечание
Для воды				
Парусина	1,5	50	0,3—0,6	Ставится на белилах или сурике
Пенька	3,0	40	2—6	То же в виде сплетенных плоских колец, ГОСТ 10379-65
Резина сплошная	3,0	40	4 6	ТУ 233-54р
Резина с парусиновой прокладкой	6,0	60	3	ГОСТ 6877-54
Картон технический	16,0	120	0,2—3	Предварительно пропитывается в масле
Паста «Феникс»	25	200	До 5	Применяется в виде приготовленной ленты или накладывается на металлическую сетку
Паранит У и УВ	40	375	0,3—6	ГОСТ 481-58. Размеры листов от 300×400 до 1 200×1 500 мм
Паранит УВ-10 (вулканизированный)	40	375	1,5—3	ТУ В69-50р
Малоуглеродистая сталь	50	Не ограничена	3—4	Гофрированные или гребенчатые ГОСТ 1050-60
Никель	100	275	—	Гребенчатые
Сталь 1Х13	250	Не ограничена	3—4	Зубчатые или линзовые
Для пара				
Асбест листовой АС	1,5	600	до 12	ГОСТ 1850-58; прокладки толщиной более 4 мм ставить не рекомендуется
Асбест шнуровой сухой	1,5	600	3—25	ГОСТ 1779-55; выпускается квадратного и круглого сечения скручиванием отдельных нитей, содержащих примесь хлопка

условий работы аппарата. Для давлений до 16 кгс/см^2 применяют прокладки толщиной 2 мм, для более высоких 0,5—1 мм.

До установки на место каждая прокладка подвергается осмотру. Не допускаются прокладки со следами излома, морщинами и трещинами. Прокладки из листовых материалов вырезают, как правило, из одного куска материала. Для аппаратов больших диаметров иногда применяют прокладки, стыкованные косыми срезами по толщине прокладки на длине не менее 50 мм. Кроме листовых материалов, для изготовления прокладок применяют шнуровые материалы: плетеную пеньку, асбестовые и резиновые шнуры, стыкуемые также косым срезом. Перечень основных материалов прокладок приведен в табл. 12-4.

Гладкая поверхность плоскостей фланцев допускается при давлении до 25 кгс/см^2 , соединение «шип—паз» — до 100 кгс/см^2 , а соединение «выступ—впадина» в случае стальных зубчатых прокладок — до 200 кгс/см^2 . В трубопроводах с давлением выше 50 ат применяются обычно стальные зубчатые и линзовые прокладки [Л. 4].

При значительных термических изменениях длины труб в теплообменных аппаратах применяют сальниковые уплотнения между подвижной трубной решеткой и кожухом аппарата или сальниковое уплотнение труб в трубных решетках. Сальниковые уплотнения применяют также для предотвращения просачивания среды через зазоры, образуемые вращающимися деталями и удерживающими их элементами аппарата (шток и крышка в запорной арматуре, мешалка и корпус в механическом реакторе и т. д.). Сальниковое устройство состоит из корпуса и нажимной втулки (рис. 12-23), ко-

Прокладочные материалы	Предельное рабочее давление, ат	Предельная температура, °С	Толщина прокладки, мм	Примечание
Паста «Феникс»	15	200	До 5	См. прокладки для воды
Паранит	40	375	0,3—2	
Паранит У	50	450	0,3—2	
Картон латексный	50	425	1—2	
Паранит УВ	60	425	1—2	ТУ-1369-50р
Малоуглеродистая сталь	100	500	До 3	Гофрированные
Сталь X18H9T	300	510	До 4	ГОСТ 7350-55; зубчатые и линзовые
Для нефтепродуктов				
Картон технический	10	30	0,2—3	ТУ/ПО НКХП 233-Н
Бумага чертежная	10	80	0,2—3	ГОСТ 597-56; пропитывается маслом
Фибра	15	80	1—1,5	ТУ НКБЛ 21 и 34—41
Паранит УВ маслоупорный	75	350	1—1,5	
Для агрессивных сред				
Резина кислото-щелочестойкая 1-й группы	6	50	3—6	ТУ 233-54р
Целлюлоза	6	80	1—3	Пропитывается водой
Полиизобутилен	—	40	1—3	—
Полихлорвиниловый пластикат	6	60	1—3	ТУ МХП 2024-49
Текстолит МА	25	100	1—3	ТУ МХП 488-50
Фторопласт-4	25	250	1—3	ТУМ 162-54
Свинец	6	140	2—3	ГОСТ 3778-65
Алюминий	25	150	1—3	ГОСТ 11070-64

торой зажимается мягкая набивка, располагаемая вокруг детали, имеющей свободу поступательного или вращательного движения.

Материалом сальниковых набивок служат хлопчатобумажные и асбестовые волокна, графит и мягкие металлы. К сальниковым материалам предъявляют следующие основные требования: высокая стойкость против влияния среды при соответствующих температурах и давлениях; отсутствие под их воздействием следов меха-

Т а б л и ц а 12-5

Набивочный материал для теплообменников, арматуры и трубопроводов

Характеристика набивки	Рабочая среда	Предельные		Форма сечения	Стандарты, преискурранты или технические условия
		давление, кгс/см²	температура, °С		
Пеньковая тальковая графитированная «Универсаль»	Горячая и холодная вода	3	130	Квадратная и круглая	ГОСТ 10330-63
Льняная просаленная «Нептун»	То же	160	100	То же	ТУ МХП № 416-Н
Асбестовая просаленная «Специаль»	Горячая вода и насыщенный пар	25	300	» »	ТУ МХП № 407-Н
Асбестовая просаленная с графитом и медной проволокой «Рациональ»	Перегретый пар	45	400	Квадратная	ТУ МХП № 415-Н
Асбестовая просаленная с графитом, медной и свинцовой проволокой «Циклон»	То же	65	500	Квадратная	—
Коллоидальный графит	» »	140	510	—	ГОСТ 4596-49
Пеньковая просаленная черная	Минеральные масла, нефть	65	100	Квадратная и круглая	ПК № 55530
Свинец	Кислота	1,5	—	—	Изготавливается на месте
Асбестовая, пропитанная маслом с графитом «Термопласт»	Перегретый пар, слабые растворы кислот, щелочей, газы	—	—	—	То же
Фторопласт-4	То же	100	250	—	» »

489 Примечание. Условия применения сальниковых набивок, характеристики их, размеры и технические условия изготовления, приемки и испытаний определяются ГОСТ 5152—66.

нического износа на уплотняемых поверхностях; устойчивая эластичность и химическая инертность по отношению к уплотнительному устройству. В табл. 12-5 приведены основные виды и области применения набивочных материалов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Какие сосуды подлежат надзору Инспекции Госгортехнадзора и какие существуют исключения?
2. Области применения и особенности конструирования и монтажа чугунных теплообменников.
3. Перечислите последовательность основных операций при изготовлении стального теплообменника из прокатных материалов.
4. Опишите технологию изготовления цилиндрического кожуха.
5. Какие способы контроля качества сварных соединений Вы знаете?
6. Нарисуйте формы обработки кромок свариваемых листов в зависимости от их толщины.
7. Назовите основные требования Госгортехнадзора к сварным теплообменникам.
8. Как изготавливают выпуклые днища?
9. Как изготавливают линзовые компенсаторы?
10. Нарисуйте основные конструкции фланцев для трубопроводов и корпусов аппаратов.
11. Опишите последовательность изготовления трубчатой системы теплообменника.
12. Чем достигаются и определяются прочность и плотность крепления труб в трубной решетке?
13. Перечислите условия для качественной развальцовки труб и виды брака при развальцовке.
14. Как изготавливают сосуды для сверхвысоких давлений? Способы их уплотнения?
15. Как изготавливают углеграфитовые теплообменники?
16. Способы и материалы для обеспечения герметичности разъемных соединений в теплоиспользующих установках.

Глава тринадцатая

МОНТАЖ, ИСПЫТАНИЕ И ПРИЕМКА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

13-1. СБОРКА ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Сборка теплообменников на заводе-изготовителе до поступления к месту монтажа необходима для подгонки и выверки деталей, а также для проведения гидравлического испытания.

Детали и узлы аппарата, подготовленные к сборке, направляют после прохождения технического контроля

на монтажный участок. Технологическая схема сборки может быть основана на операциях сборки как отдельных деталей, так и мелких и укрупненных узлов. Сборка изделия из укрупненных узлов обеспечивает повышенную точность монтажа и высокую производительность труда, а также хорошее использование площадей и подъемно-транспортных механизмов.

Для удобства сборочных работ и соответствия последовательности сборки аппарата технологической карте детали и узлы маркируют условными обозначениями по порядку их поступления. Для сокращения сроков сборки и повышения производительности труда необходимо: оборудовать участок подъемно-транспортными устройствами, разработать приспособления для вращения, кантовки, зажимания, упора, прихватки, измерения, контроля и испытания узлов и изделий, а также иметь необходимые электрические и пневматические инструменты.

В качестве примера ниже приведена технологическая схема изготовления элемента теплообменника типа «труба в трубе» (рис. 13-1 и 13-2). Спецификация основных узлов и деталей теплообменника приведена в табл. 13-1 [Л. 76].

По показанной на рис. 13-2 технологической схеме теплообменник типа «труба в трубе» собирают на сборочном участке как из отдельных деталей, так и из узлов.

Заготовка материала. После приемки по сертификатам на заготовительный участок поступают со склада прокат и трубы следующих марок и размеров:

1. Листовая аустенитная сталь Х18Н9Т толщиной 28 мм для изготовления фланцев к внутренним трубам и калачам (поз. 1 и 12).
2. Листовая углеродистая сталь Ст. 3 толщиной 16 и 20 мм для изготовления фланцев к штуцерам наружной трубы (поз. 4 и 11).

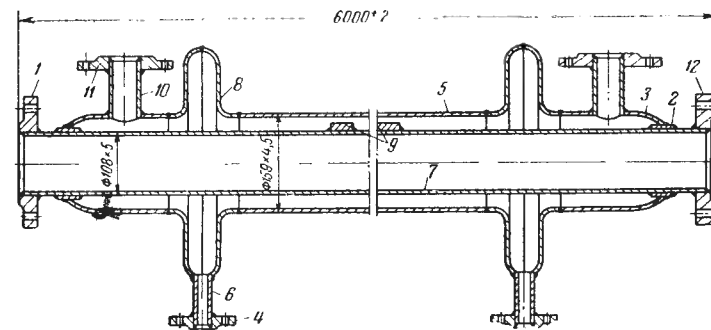


Рис. 13-1. Элемент теплообменника «труба в трубе»

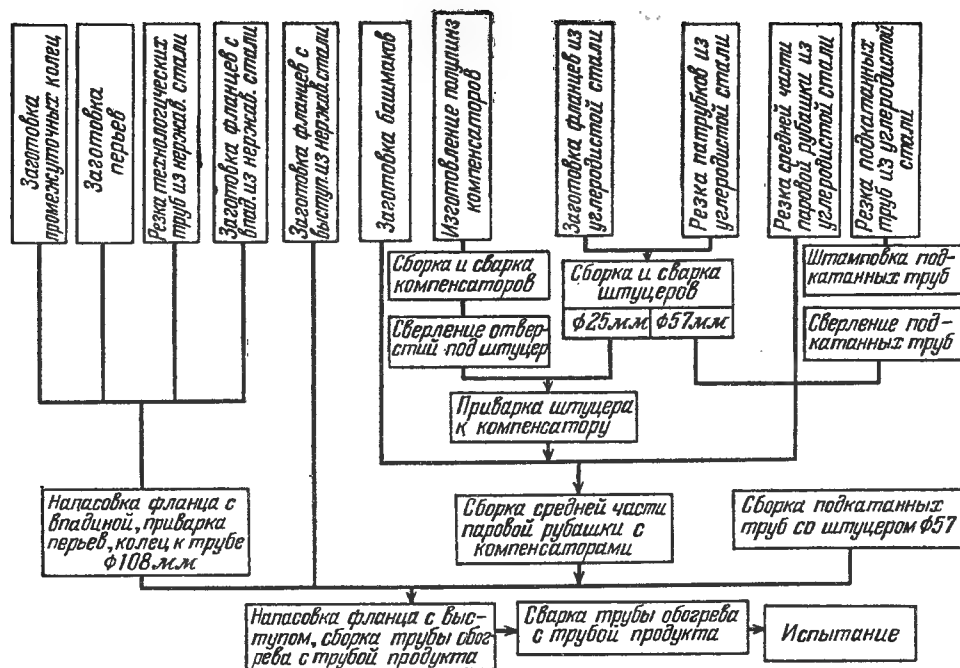


Рис. 13-2. Технологическая схема изготовления теплообменника «труба в трубе».

Таблица 13-1

Спецификация к рис. 13-1

Позиции	Наименование детали	Марка стали	Количество на одно изделие, шт.	Позиции	Наименование детали	Марка стали	Количество на одно изделие, шт.
1	Фланец диаметром 220×110 мм	X1879T	1	7	Труба диаметром 108×5 мм	X18H9T	1
2	Кольцо	X18H9T	2	8	Линзовый компенсатор	Ст.3	2
3	Подкатанная труба	20	2	9	Перья	X18H9T	9
4	Фланец диаметром 105×25 мм	Ст.3	2	10	Труба диаметром $57 \times 3,5$ мм	20	2
5	Труба диаметром $159 \times 4,5$ мм	20	1	11	Фланец диаметром 160×58 мм	Ст.3	2
6	Труба диаметром $25 \times 2,5$ мм			12	Фланец диаметром 220×110 мм	X18H9T	1

3. Листовая углеродистая сталь Ст. 3 толщиной 4 и 6 мм для изготовления линзовых компенсаторов (поз. 8) и опор.

4. Трубы из стали X18H9T диаметром 108×5 мм для изготовления внутренних труб (поз. 7), калачей и промежуточных колец (поз. 2).

5. Трубы диаметром 159×4,4 мм из стали 20 для изготовления наружных труб (поз. 3 и 5).

6. Трубы диаметром 57×3,5 и 25×2,5 мм из стали 20 для изготовления штуцеров (поз. 6 и 10).

На заготовительном участке листовый материал и трубы разрезают на мерные заготовки, правят и размечают, после чего они поступают на последующую обработку. Заготовки для внутренней трубы из стали X18H9T нарезают по размеченным размерам на трубоотрезном станке. Промежуточные кольца (поз. 2) изготавливают из тех же труб отрезкой по размеру с последующим расширением их на гидравлическом прессе.

Фланцы для внутренних труб вырезают кислородно-флюсовым резак. На токарном станке на фланцах обрабатывают плоскости и внутренний и наружный диаметры, а также вытачивают выступ в одном фланце и впадину в другом для прокладки. Планировку торца выступа производят после приварки его к трубе. Отверстия под болты во фланцах сверлят по кондуктору. На заготовку наружных труб (рубашек) отбирают трубы из стали 20: на трубоотрезном или токарном станке нарезают трубы для деталей поз. 3 и 5 и обрабатывают кромки под сварку.

На прессе с помощью штампа обжимают один конец трубы (поз. 3) и вырезают в нем отверстия под штуцера. Штуцера заготавливают по общепринятой технологии. Напасовку фланца на патрубки, их прихватку и приварку к наружной трубе производят в приспособлениях, обеспечивающих строгую перпендикулярность осей трубы и штуцера.

Заготовки для линзовых компенсаторов вырезают из листового стали Ст. 3 толщиной 4 мм при помощи газового резака или на прессе. Вырезанные диски отжигают и смазывают консистентной смазкой. Двумя последующими операциями их отбортовывают на прессе по наружной и по внутренней кромкам. Для придания половинам линз нужных размеров и для образования фасок под сварку их обрабатывают на токарном станке. Затем обезжиренные в каустики полулинзы промывают и передают на электросварку. После сварки половин в линзах рассверливают отверстия под штуцера и приваривают к ним штуцера (рис. 13-1, поз. 4 и 6). Отдел технического контроля (ОТК) производит наружный осмотр готовых линз и одну десятую часть их проверяет по техническим условиям на компенсирующую способность.

Сборка теплообменника. После прохождения технического контроля трубные заготовки, фланцы, компенсаторы, опоры и другие части аппарата направляют в определенной последовательности на сборочно-сварочный участок. Сборочные стенды должны быть обеспечены приспособлениями и кондукторами, позволяющими выполнять сборку и прихватку монтируемых деталей аппарата «труба в трубе» без применения линейных измерений.

Последовательность сборки аппарата примерно следующая:

1) устанавливают и прихватывают к внутренней трубе (поз. 7 табл. 13-1) первый фланец (поз. 12), представляющий собой одновременно базовую деталь на стенде-кондукторе; после сварки трубу

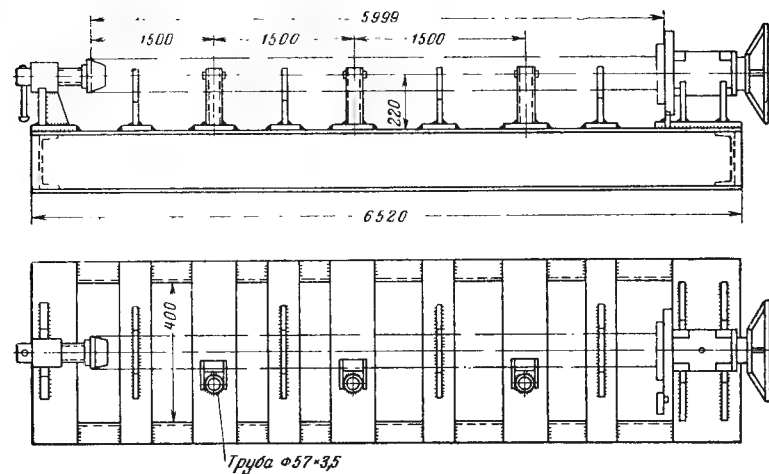


Рис. 13-3. Стенд для предварительной сборки деталей теплообменника «труба в трубе».

с одним фланцем обрабатывают на токарном станке для окончательной доводки плоскости фланца, имеющего впадину;

2) трубу с фланцем возвращают на стенд-кондуктор, где к ней приваривают промежуточные кольца (поз. 2);

3) на трубу (поз. 7) надевают переходный конец наружной трубы-рубашки (поз. 3), после чего к внутренней трубе приваривают перья-распоры (поз. 9);

4) собирают среднюю часть наружной трубы (поз. 5) с линзовыми компенсаторами (поз. 8) и концевыми башмаками (поз. 3, 10 и 11) и прихватывают их электросваркой;

5) на специальном стенде собирают узел внутренней трубы с частью наружной трубы; после напосовки второго фланца на внутреннюю трубу выверяют зазоры и прихватывают все детали и узлы электросваркой;

6) собранный аппарат передают на сварочный стенд (рис. 13-4) для наложения швов на все стыкуемые узлы и детали;

7) после сварки аппарат подают на токарный станок для окончательной планировки второго фланца (поз. 1);

8) персонал ОТК осматривает собранный аппарат и производит гамма-просвечивание и гидравлическое испытание.

Выдерживавший испытание аппарат маркируют, окрашивают, устанавливают на нем временные заглушки и направляют на склад готовой продукции. Данные об изготовлении и испытании заносят в паспорт аппарата и в специальный регистрационный журнал, хранящийся на заводе-изготовителе.

Аппарат, подведомственный Госгортехнадзору, должен иметь наглухо прикрепленную на видном месте его лицевой стороны металлическую пластинку с обозначением:

1) завода-изготовителя аппарата;

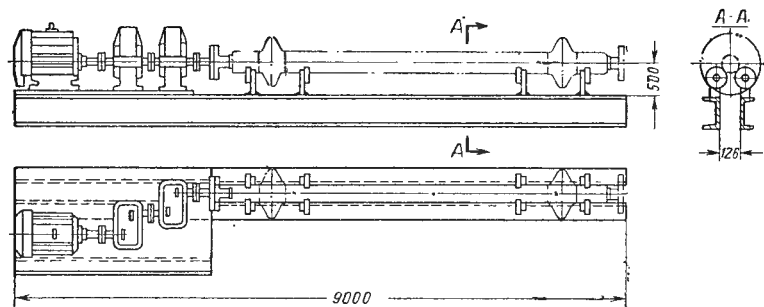


Рис. 13-4. Сварочный стенд.

- 2) номера аппарата по списку завода-изготовителя;
- 3) года изготовления аппарата;
- 4) наибольшего рабочего давления;
- 5) наибольшей температуры стенки, если она превышает 250° С;
- 6) регистрационного номера местной Инспекции Госгортехнадзора (выбирается владельцем сосуда).

Помимо прикрепления к аппарату указанной пластины, завод-изготовитель должен выбить на наиболее массивной части аппарата — штуцере, фланце или других элементах — клейма, содержащие данные пп. 1—4.

13-2. МОНТАЖ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ

Организация монтажно-сборочных работ

Монтаж теплообменной аппаратуры производят ремонтно-монтажные бригады предприятия или специализированные организации.

Монтаж сложного оборудования и крупные ремонты должны производиться по проекту ремонтно-монтажных работ, включающему: данные об объеме ремонтных работ, данные о способе ведения работ и их последовательности, расчет потребности в такелажном инструменте, оборудовании и материалах, расчет потребности в рабочей силе; инструкцию по технике безопасности при выполнении работ.

Приемка и хранение оборудования и подготовительные работы должны обеспечивать технически целесообразное, экономное и высокопроизводительное ведение монтажа.

Теплообменная аппаратура, поступающая с завода-изготовителя, тщательно проверяется и принимается в соответствии с технической документацией, включающей паспорт, книгу Госгортехнадзора, инструкцию по монтажу и эксплуатации, перечень запасных частей и инструментов, а также рабочие чертежи запасных и быстроизнашивающихся частей.

Оборудование, предназначенное для хранения, распределяют после очистки от грязи и масла и тщательного осмотра на четыре группы:

1) оборудование, портящееся под действием атмосферных осадков и требующее хранения в теплых закрытых складах: регуляторы, контрольно-измерительные приборы, щиты управления, аппаратура автоматического регулирования, эмалированные, гуммированные и футерованные детали;

2) оборудование, реагирующее на воздействие атмосферных осадков и сырости, но допускающее хранение в закрытых холодных помещениях: аппараты и детали из цветных металлов, арматура, детали трубопроводов, редукторы, мешалки, шнеки, моторы и т. п.;

3) оборудование, реагирующее на воздействие осадков, но допускающее хранение под навесом в условиях переменной влажности и температуры: стальные теплообменники, барабаны и крышки, топочные механизмы, лестницы и площадки, гарнитура;

4) оборудование, которое может храниться на открытых площадках: громоздкая чугунная и стальная аппаратура, металлические конструкции, стальные и чугунные трубы больших диаметров и т. п.

Для предохранения оборудования от атмосферной коррозии все части аппаратуры и механизмов следует покрывать масляной краской или лаком, а детали или части, не подлежащие окраске, — густым слоем консистентной смазки и обертывать плотной бумагой или тканью (шейки валов, вкладыши подшипников и т. п.).

На поступившее для хранения оборудование заводятся карточки, необходимые для строгого учета, проводимого 2—3 раза в год.

Перед началом монтажа производят планировочные и дорожные работы, прокладку вспомогательных трубопроводов и электрического кабеля, установку приспособлений, монтажного и такелажного инструмента.

Теплообменные аппараты доставляются заводом-поставщиком к месту монтажа, как правило, в собранном виде, за исключением аппаратов, размеры которых превышают транспортные габариты.

В зависимости от размера аппараты разделяют на габаритные и негабаритные. Определение «негабаритная аппаратура» применяют в соответствии с определением «негабаритный груз», установленным на железнодорожном транспорте (ГОСТ 9238-59). Негабаритными считаются аппараты, которые при погрузке на подвижной состав, стоящий на прямом пути или проходящий по кривым, выходят за пределы очертания габарита (рис. 13-5). При этом предполагается, что аппараты или узлы не могут быть разобраны для уменьшения их размеров. По определению, данному выше, негабаритная аппаратура не всегда относится к нетранспортируемой. На железнодорожном транспорте в отдельных случаях и в определенных пределах допускаются к перевозке относительно негабаритные грузы. В таких случаях перевозка аппаратов сопряжена с закрытием встречного движения и с другими предосторожностями. Согласно действующим межреспубликанским техническим условиям МРТУ-2-04-10-63 предусматривается перевозка железнодорожным транспортом аппаратов весом до 240 т, диаметром до 3980 мм, длиной до 21 м, а также аппаратов диаметром

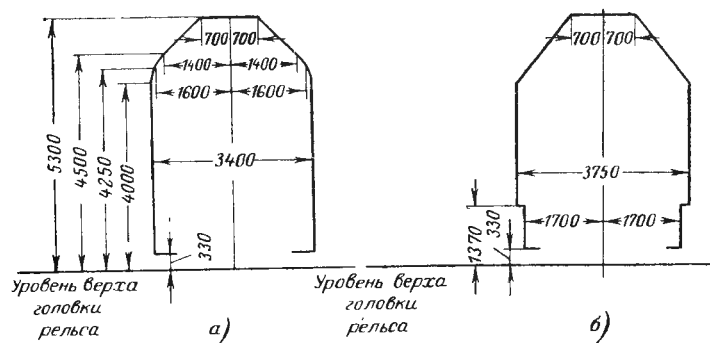


Рис. 13-5. Габарит подвижного состава.

а — допускаемый к обращению по всей сети железных дорог СССР (I-T);
б — допускаемый к обращению на реконструированных участках железных дорог СССР (Т).

от 3915 до 3848 мм и длиной соответственно от 22 до 30 м. Кроме того, согласно тем же условиям с 1/1 1964 г. предусматривается перевозка речным транспортом поряду магистральных водных путей на судах аппаратуры диаметром не свыше 8 м, длиной до 55 м и на плаву аппаратуры диаметром до 10 м, длиной до 100 м.

Сборочные работы на монтаже заключаются в установке аппаратов на фундаменте, установке и присоединении вспомогательного оборудования, присоединении трубопроводов, деталей узлов поступления и отвода продуктов, установке приборов теплового контроля и автоматического регулирования. В процессе монтажа выявляются и устраняются дефекты конструкции и изготовления аппаратуры. Одновременно осуществляется наладка работы деталей и механизмов в целях подготовки аппаратов к эксплуатации.

Проектом производства монтажно-сборочных работ предусматривается обычно следующая последовательность операций сборки:

1. Установка корпуса аппарата на фундамент.
2. Установка греющей поверхности внутри аппарата.
3. Установка обслуживающих площадок и лестниц.
4. Установка элементов, находящихся внутри аппарата (сепараторов, мешалок, распыливающих устройств, регуляторов уровня и др.).
5. Установка крышки аппарата.
6. Подгонка и присоединение всех трубопроводов.
7. Установка арматуры и контрольно-измерительных приборов.
8. Герметизация мест соединения аппарата (крышек, люков, фланцев, сальниковых уплотнений и др.).
9. Присоединение вспомогательных механизмов и устройств.
10. Установка ограждений.
11. Испытание аппарата на герметичность и сдача инспектору Госгортехнадзора.
12. Обкатка механизмов в течение одной рабочей смены.
13. Пробная эксплуатация установки.
14. Проведение теплоизоляционных работ.
15. Сдача установки в эксплуатацию.

Фундаменты аппаратов, установленные на естественном грунте, имеют, как правило, незначительную вибрацию, которая не оказывает влияния на рабо-

ту аппарата и расположенного вблизи оборудования. При установке аппаратов на площадках нужно обращать особое внимание на тщательность балансировки вращающихся механизмов (шквивов, питателей, мешалок и др.), что необходимо для предотвращения значительной вибрации, вредно влияющей на здание или на установленное оборудование.

Глубина заложения фундамента в естественном грунте должна быть не менее глубины его промерзания. В табл. 13-2 приведена глубина промерзания грунтов для районов некоторых городов.

При установке теплообменного аппарата на металлической конструкции ее колонны следует сваривать и собирать по шаблонам и кондукторам с минимальными

Т а б л и ц а 13-2

Глубина промерзания грунтов, м

Город	Глубина промерзания грунта, м	Город	Глубина промерзания грунта, м
Одесса	0,5	Волгоград	1,4
Минск	0,8	Магнитогорск,	
Киев, Таллин . . .	1,0	Свердловск, Омск	1,6
Москва, Ленинград	1,2		

допусками в размерах (± 5 мм). Установленные и выверенные колонны крепят на фундаментах анкерными болтами. На кронштейнах смонтированных колонн устанавливают неподвижные опоры и подвижные ролики для установки аппарата. После установки корпуса и основных элементов аппарата приступают к монтажу обслуживающих площадок. Коммуникации (паро- и конденсатопроводы, трубопроводы обрабатываемой среды, дренажи, воздушники и др.) монтируют после полной сборки, окончательной выверки и закрепления аппарата на его основании.

Монтаж арматуры и трубопроводов в пределах теплоиспользующей установки

Прокладка готовых труб, фасонных частей и арматуры, а также блоков трубопроводов (при блочной сборке) производится на предварительно установленных опорах

и подвесках. При этом на неподвижной опоре труба должна лежать без зазора на подушке, а хомут должен плотно прилегать к стенке трубы; подвижные опоры не должны препятствовать свободному перемещению трубопровода от теплового удлинения; не должно быть перекосов и заеданий подвижных частей. Шейки роликов подвижных опор должны лежать на всей опорной поверхности гнезда, а подвижная плоскость роликовой опоры — на ролике без зазора; ролики и шарики подвижных опор должны свободно, без заеданий, вращаться в своих гнездах.

Пружинные подвески должны иметь приспособления для регулирования сжатия пружин. Нагрузка пружинных опор при установке на холодный трубопровод не должна превышать 50% максимально допустимой.

После укладки всех деталей или блоков собираемого участка трубопровода производится предварительная сборка фланцевых соединений на болтах без прокладок. Закрепив первое фланцевое соединение, тщательно проверяют параллельность уплотняющих поверхностей при помощи щупа. Окончательное сболчивание всех фланцевых соединений производят после окончания укладки, выверки и сборки на временных болтах отдельных участков трубопроводов. Перед окончательным сболчиванием устанавливают постоянные прокладки.

Для быстрой подгонки стыков под сварку на сварных трубопроводах при укладке труб следует устанавливать подкладные кольца, а если они не предусмотрены, прокладывать лист толщиной, равной величине требуемого зазора между свариваемыми трубами. Закрепив трубы в опорах и удалив заложенные листы, необходимо прихватить трубы между собой, еще раз выверить укладку всего трубопровода и после этого окончательно сваривать отдельные части или блоки.

Стыки для холодного натяга трубопровода располагают вблизи гнутых компенсаторов или самокомпенсирующих гнутых участков трубопровода. Компенсатор должен быть растянут в холодном состоянии на величину, указанную в чертеже. Растяжка компенсатора производится натяжением оставленного для этой цели стыка трубопровода после сварки или закреплением фланцев всех стыков на участке между мертвыми опорами и закреплением до отказа самих неподвижных опор.

13.3. ИСПЫТАНИЕ СОСУДОВ НА ПРОЧНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ

Испытание для проверки на прочность и плотность аппаратов, работающих под давлением свыше 0,7 ат или под вакуумом, производят одним из следующих способов: гидравлическим испытанием; испытанием керосином; проверкой герметичности водяным паром; пневматическим испытанием; испытанием на герметичность тепчеискателем; испытанием флуоресцеином.

Гидравлическое испытание. В процессе сборки аппарата или всей установки производят отдельно гидравлическое испытание корпусов, трубной системы (если она извлекается из аппарата) и собранного аппарата, а также аппарата со вспомогательным оборудованием на месте эксплуатации.

Правилами Госгортехнадзора установлены следующие нормы испытательного давления для сосудов (кроме цельнолитых): для сосудов на рабочее давление до 5 ат — полуторное рабочее давление, но не менее 2 ат; для сосудов на рабочее давление более 5 ат — 1,25 рабочего давления, но не менее рабочего давления плюс 3 ат; для сосудов, работающих под вакуумом, — 2 ат.

При гидравлическом испытании аппаратов значительных размеров принимают меры против прогиба корпуса при наполнении его водой.

Подготовку и проведение гидравлического испытания корпуса аппарата производят в следующем порядке. После внутреннего и внешнего осмотра и очистки заглушают все отверстия, патрубки, штуцера и люки. Для этого применяют резьбовые пробки и заглушки с резиновыми прокладками, а также крышки для люков и лазов. В отверстия, просверливаемые в верхней части аппарата (обычно в заглушках на штуцерах), или в имеющиеся штуцера ввертывают или вваривают временные ниппеля. Через один ниппель аппарат наполняют посредством шланга водой из водопровода, другой ниппель служит для выхода воздуха из аппарата при наполнении его водой. Третий временный ниппель, устанавливаемый в нижней части аппарата, служит для удаления воды после испытания.

Чтобы поверхность аппарата не запотевала, температура воды должна быть не ниже температуры окружающей среды, но не выше 40° С, чтобы температурные расширения не расстроили вальцовку. Нельзя также производить гидравлическое испытание сосудов водой с

температурой 0° С. Необходимо следить за тем, чтобы в аппарате не оставались воздушные мешки. После наполнения водой аппарат плотно закрывают резьбовой пробкой с резиновой прокладкой. Вместо шланга от водопровода к водяному ниппелю присоединяют шланг от гидравлического насоса или пресса с ручным механическим приводом. На шланге должен быть установлен трехходовой кран для сообщения аппарата с атмосферой и для установки манометра. Приведя в действие насос, в аппарате создают испытательное давление, поддерживаемое в течение 5 мин; за это время показание манометра не должно заметно измениться. Через 5 мин давление в аппарате снижают с помощью трехходового крана до рабочего давления, которое поддерживают в течение всего периода технической приемки аппарата, но не менее 2 ч. При этом производят наружный осмотр аппарата с целью обнаружения нарушений прочности или плотности: вспучиваний в корпусе, разрывов бандажей, трещин в швах или возле отверстий, течи и запотевания в сварных и заклепочных швах и в резьбовых соединениях. Район швов обстукивают молотком весом от 0,5 до 1,5 кг. При испытаниях кожуха с вставленной трубной системой или с жестко закрепленными трубками просматривают плотность вальцовки или других креплений труб. Места с недостаточной плотностью или прочностью отмечают мелом.

Результаты гидравлического испытания признают удовлетворительными, если в течение 2 ч снижение давления по манометру не превышает 5% испытательного давления. Результаты гидравлического испытания заносят в книгу-паспорт аппарата, хранящуюся в ОТК завода.

Для удобства обнаружения мест неплотности в сварных соединениях сварные швы перед испытаниями окрашивают мелом, разведенным на воде, а затем просушивают. В случае неплотности в местах пропусков воды при гидравлическом испытании образуются влажные пятна, видимые на меловом покрытии. Дефектные места в сварных швах вырубают на всю глубину и вновь заваривают вручную электродом с качественной обмазкой. Трубы с признаками неплотности в месте закрепления (течи, слезинки, запотевания) подвальцовывают, подваривают или заменяют новыми. Подвальцовка (не более 2 раз) дает положительный результат только в том слу-

чае, когда деформация трубной доски происходит в пределах упругой области.

После устранения обнаруженных дефектов обязательно проводят повторное гидравлическое испытание в прежнем порядке.

Для создания условий безопасности в процессе работ, связанных с гидравлическими испытаниями и устранением дефектов, все работы производятся при надежной изоляции испытательного стенда от других рабочих мест в цехе. Рабочие, участвующие в испытаниях, обеспечиваются защитными приспособлениями и устройствами: спецодеждой, очками, масками, переносными щитками. Работы по устранению дефектов (подвальцовку труб, вырубку швов, заварку и др.) производят только на сосуде, не наполненном водой, и при атмосферном давлении.

Испытание керосином. Обнаружение течи в аппаратах с трубами, приваренными к решеткам, представляет большие трудности. Гидравлическое испытание водой не дает, как правило, хороших результатов, так как микроскопические трещины в сварных швах обнаруживаются только при испытательном давлении и при рабочей температуре. Создание рабочих условий во время испытаний не всегда осуществимо. В таких случаях хорошие результаты дает гидравлическое испытание трубчатки или всего аппарата керосином. Для обнаружения протекания керосина поверхности трубных решеток и сварных швов сосуда окрашивают меловым раствором и просушивают. Наполненный керосином сосуд выдерживают в течение 30—50 мин. Если по истечении этого времени на покрашенных местах не появятся масляные пятна, плотность швов признается удовлетворительной.

Проверка герметичности водяным паром. При невозможности проведения гидравлического испытания керосином можно рекомендовать проверку водяным паром давлением 0,5 ат. Пар, проникая через неплотности, также образует влажные пятна, хорошо различимые на меловой побелке.

Пневматическое испытание. Если гидравлическое испытание неосуществимо (большие напряжения от веса воды, трудность удаления воды, наличие внутри сосуда футеровки, препятствующей заполнению сосуда

водой), разрешается заменять его пневматическим испытанием с помощью воздуха или инертного газа на такое же испытательное давление, как при гидравлическом способе. Пневматические испытания производят с особыми мерами предосторожности в присутствии лиц, ответственных за их проведение и за технику безопасности.

Основные правила пневматического испытания следующие:

1. Слабые элементы сосуда окрашивают мелом, а сварные швы и разъемные соединения смачивают мыльной водой.

2. Давление в сосуде повышают постепенно до 50% рабочего давления. Если обнаружатся мыльные пузырьки, принимают меры к устранению течи на сосуде, освобожденном от пневматического давления.

3. Дальнейшее повышение давления до испытательного производят ступенями по 10% рабочего давления, с тщательным осмотром в перерывах швов и изменений в меловом покрытии на слабых местах сосуда.

4. Давление в сосуде должно быть немедленно снижено на $\frac{1}{3}$, если в наиболее слабых элементах сосуда появляются признаки текучести металла (слой меловой побелки растрескался и начал осыпаться).

5. Сосуд считается выдержавшим пневматическое испытание, если при его проведении не были замечены текучесть металла и пропуски воздуха в сварных швах и в разъемных соединениях. Если при удовлетворительной герметичности сосуда обнаружены признаки текучести металла, то либо максимальное рабочее давление устанавливают равным 50% испытательного независимо от установленного по проекту, либо сосуд бракуют.

6. Для быстрого выявления пропусков и течи в сварных швах и в разъемных соединениях аппарата рекомендуется производить пневматическое испытание воздухом или газом с примесью аммиака. Если к сварным швам и разъемным соединениям сосуда поднести смоченный в соляной кислоте жгут, то образование белого дыма указывает на наличие течи и пропусков.

Испытание течейскалем. Установки и аппараты, работающие под разрежением, должны удовлетворять требованиям высокой герметичности. Вакуумные испытания аппаратов и установок производят при помощи течейскалей.

Перед испытанием отверстия смонтированного аппарата или установки герметически закрывают пробками или заглушками на высококачественных прокладках. После этого производят предварительное испытание на герметичность воздухом или инертным газом под давлением, соответствующим техническим условиям. Затем устраняют неплотности в швах и в уплотняющих соединениях, обнаруженные обмыливанием. Убедившись в отсутствии видимых утечек, приступают к откачке из аппарата или установки воздуха вакуум-насосом. По достижении постоянного рабочего вакуума дальнейшее определение мест проникновения воздуха производят течеискателем.

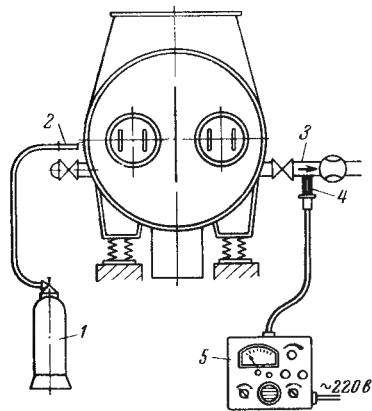


Рис. 13-6. Схема галоидного течеискателя.

1 — баллон с фреоном; 2 — сопло; 3 — трубопровод для отсоса воздуха; 4 — датчик; 5 — измерительный прибор.

В качестве примера рассматривается работа галоидного (ионизационного) течеискателя. Принцип его действия основан на эффекте эмиссии положительных ионов, испускаемых раскаленной платиной, резко возрастающем в присутствии паров галоидов. Этот эффект заметен при парциальном давлении паров галоида порядка 10^{-8} мм рт. ст.

Схема устройства для отыскания неплотностей в сосудах, работающих под глубоким вакуумом, показана на рис. 13-6. Газ, содержащий галоид, находится в сжатом состоянии в баллоне 1, из которого он выходит через редукционный клапан, гибкий шланг и сопло 2. Струю выходящего из сопла газа направляют на места, где предполагается наличие неплотности. Если она действительно имеется, газ проникает в сосуд, а затем достигает трубопровода 3 для отсоса воздуха. Датчик 4 галоидного течеискателя целесообразно располагать в этом трубопроводе возможно ближе к сосуду, что обеспечивает быстрое и надежное обнаружение газа, содержащего галоид. Появление последнего в датчике вызывает отклонение

стрелки микроамперметра, включенного в электрическую схему измерительного прибора 5, соединенного с датчиком при помощи бронированного кабеля. Измерительный прибор смонтирован в общем корпусе с усилителем и устройством для подключения к сети. В качестве вещества, содержащего галоид, хорошо зарекомендовал себя фреон-12 (CF_2Cl_2). Малые его концентрации внутри сосуда дают резкое повышение эмиссии ионов, испускаемых раскаленной платиной.

Испытание флуоресцеином. Одним из самых надежных и быстрых современных методов обнаружения неплотности в аппаратах, предназначенных для работы под вакуумом, является люминесцентный метод с использованием флуоресцеина (диоксифлуорана) $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_{15}$ — органического соединения (красный кристаллический порошок), слабо растворимого в воде. Флуоресцеин легко смывается водой, нетоксичен, коррозионно не активен, в щелочных растворах сильно флуоресцирует. Применение его при испытании конденсаторов тепловых электростанций подтвердило возможность обнаруживать неплотности, остающиеся незамеченными при гидравлическом испытании.

После остановки турбогенератора из водяных камер конденсатора спускают оставшуюся в них воду, а паровое пространство конденсатора заполняют конденсатом. Через люк или штуцер в конденсатор заливают раствор флуоресцеина. Наиболее благоприятная концентрация флуоресцеина в воде — 7—10 мг/л. После заполнения парового пространства конденсатора раствором флуоресцеина облучают трубные решетки и другие места возможных неплотностей переносной ультрафиолетовой лампой. Вода, содержащая флуоресцеин, светится под действием ультрафиолетового облучения ярким желто-зеленым светом, отчетливо выявляя малейшие неплотности на обследуемой поверхности. Во время облучения поверхности ультрафиолетовыми лучами вблизи не должно быть белого света, так как при этом эффект свечения флуоресцеина резко снижается. Качество контроля плотности повышается при увеличении давления воды в испытываемом объеме до 1—2 ат.

Для ультрафиолетового облучения можно пользоваться люминесцентными минералоскопами, оборудованными медицинской ртутно-кварцевой лампой и ультрафиолетовым фильтром.

Значение тепловой изоляции

Теплообменные аппараты и установки, а также вспомогательное оборудование к ним и трубопроводы, наружная стенка которых имеет температуру выше 50 или ниже 0°С, после монтажа, наладки и приемки должны быть покрыты тепловой изоляцией.

Назначение тепловой изоляции:

- а) уменьшение потерь тепла и теплопритоков (в холодильных установках);
- б) поддержание требуемой температуры технологического процесса при наименьших затратах энергии;
- в) повышение производительности технологического оборудования вследствие стабильности теплового режима;
- г) создание нормальных санитарно-гигиенических и безопасных условий труда путем сохранения нормальной температуры в рабочих помещениях и предохранения обслуживающего персонала от ожогов;
- д) выравнивание температур внутренней и наружной поверхностей установки, что способствует устранению запотевания поверхности и снижению температурных напряжений в аппаратах;
- е) защита стенки сосуда от влияния внешней коррозии и, следовательно, продление срока службы оборудования;
- ж) в холодильной технике — длительное сохранение продуктов.

Свойства теплоизоляционных материалов

К теплоизоляционным материалам предъявляют следующие основные требования [Л. 90]:

1. Низкая теплопроводность. По величине коэффициента теплопроводности λ при температуре 100°С теплоизоляционные материалы разделяются на четыре группы:

Класс	λ , ккал/м·ч·град
А	$\leq 0,07$
Б	0,07—0,10
В	0,11—0,15
Г	0,16—0,18

2. Малый объемный вес. Объемный вес изоляционных материалов находится в пределах от 100 до 400 кг/м³. Материалы с малым объемным весом отличаются, как правило, низкой прочностью, что требует усиленной конструкции защитного покрытия. Общий вес изоляции и конструкции защитного покрытия не должен превышать 650 кг/м³ в стационарных установках, 250 кг/м³ в передвижных.

3. Низкая гигроскопичность и способность мало набухать при погружении в воду: с увеличением влажности увеличиваются теплопроводность и объемный вес изоляции и снижается ее прочность. Насыщение влагой изоляционных материалов, предназначенных для работы при температуре ниже 0°С, имеет большое значение, так как коэффициент теплопроводности льда (1,9 ккал/м·ч·град) почти в 4 раза больше коэффициента теплопроводности воды (0,5 ккал/м·ч·град) и в 40 раз больше коэффициента теплопроводности стеклянной ваты (0,039 ккал/м·ч·град).

4. Высокая теплостойкость (способность материала выдерживать многократные резкие изменения температуры), высокая температуростойкость, т. е. способность сохранять свойства под воздействием высоких температур, и высокая морозостойкость.

5. Прочность; прочность теплоизоляционной конструкции может быть повышена устройством каркаса и наложением специальных укрепляющих слоев, а также созданием прочного отделочного наружного слоя.

6. Низкие воздухо(газо)- и паропроницаемость; газы или пары вызывают, кроме охлаждения, увлажнение, коррозию и разрушение стенки аппарата и изоляционных конструкций.

7. Низкая коррозионная агрессивность; изоляционный материал не должен вызывать коррозии оборудования и крепления или способствовать ей.

8. Высокая биостойкость: изоляционный материал должен быть устойчив против гниения, не должен способствовать развитию микроорганизмов и насекомых, а также не должен быть съедобным для грызунов.

9. Отсутствие специфического запаха и невосприимчивость к запахам (важно для холодильников пищевой промышленности).

Коэффициент теплопроводности, объемный вес и температура применения теплоизоляционных и огнеупорных материалов

Наименование материала	Объемный вес, кг/м³	Коэффициент теплопроводности	При температуре, °С	Предельная температура применения, °С
Алюминиевая фольга	120—130	0,055	20	550
Асбестит	1 200	0,25	100	100
Асбестовый картон	1 000—14 000	0,135+0,00016 t_{cp}	—	600
Асбестовая ткань	АТ-7	0,106+0,000159 t_{cp}	—	450
	АТ-8			450
	АТ-9			200
Асбестовый шнур	—	0,12+0,0002 t_{cp}	—	220
Асбозурит Д	650	0,16	100	900
Асбозурит ДИ	450	0,08	100	600
Асбозурит Т	850	0,20	100	900
Асбослюда	580	0,12—0,118—0,125	0—50—100	600
Асботермит марки 500	500	0,10—0,115	30—100	600
Асбоцементные плиты	300	0,075	50	450
Бетон	1 900—2 000	0,8—1,1	20	100
Битум	950—1 000	0,26—0,30	20	90
Вата стеклянная	130	0,034+0,0003 t_{cp}	—	450
Вермикулит зернистый обожженный	150	0,09	100	1100

Продолжение табл. 13-3

Наименование материала	Объемный вес, кг/м³	Коэффициент теплопроводности	При температуре, °С	Предельная температура применения, °С
Войлок отопительный	90	0,04—0,05	20	90
Войлок строительный	160	0,04—0,05	20	90
Вулкани́т	400	0,078—0,087	50—100	600
Газобетон теплоизоляционный	400—600	0,095—0,12	25	400
Гипсовая штукатурка	1 600—1 700	0,33	20	100
Диатомит инзенский	650	0,07—0,10	20	1 000
Древесноволокнистые плиты изоляционные	400	0,047	20	100
Изделия из ньювеля	275—300	0,09	200	375
Изделия из совелита	360—380	0,10	200	500
Изделия теплоизоляционные диатомовые	500	0,10—0,16	50—350	900
Камышит	300—400	0,09	20	60
Магнезиальная мастика	1000	0,2	20	100
Минераловатно-асбестовые плиты КЧ	350	0,068	50	160—450
Минераловатные плиты	350	0,065	30	60
Минеральная вата	200	0,045—0,055	30—100	600
Минеральная пробка	325	0,055	20	70
Минеральный войлок	200	0,055	30	60—200

Продолжение табл. 13-3

Наименование материала	Объемный вес, кг/м³	Коэффициент теплопроводности	При температуре, °С	Предельная температура применения, °С
Новоасбозурит марки 600	600	0,12—0,135	30—100	600
Ньювель	350	0,70	50	350
Опилки древесные	150—250	0,05—0,08	20	60
Пенобетон	400	0,085	20	400
Пеностекло	300	0,071	20	300
Полихлорвинил	100	0,050	20	70
Пробковые плиты	260	0,05	20	120
Руберойд	600—800	0,12—0,15	20	50
Слюда щипаная, скрап	275	0,10	100	1 000
Совелит	500	0,085	50	450
Стекловолокно, порошок	590	0,075	30	—
Толь кровельный	500—600	0,15—0,20	20	50
Торфоплиты	220	0,05	0	100
Трепел	800	0,12—0,13	20	800
Цементная штукатурка	1 800	0,85—1,0	20	100
Шамотные огнеупорные изделия	1 900	0,6+0,00055 $t_{ср}$	—	1 670
Шевелин	150	0,04—0,05	20	60
Шлак:				
котельный	700—1 000	0,175—0,245	20	50
доменный	500—900	0,135—0,195	20	50

10. Дешевизна, доступность и хорошая формуемость. Теплоизоляционные материалы отвечают обычно не всем из этих требований. В каждом конкретном случае выбор изоляционного материала и конструкции изоляции следует производить на основе технико-экономических соображений. Некоторые свойства основных теплоизоляционных материалов приведены в табл. 13-3.

Монтаж теплоизоляционных конструкций

По структуре и виду различают: мастичные (сыпучие), штучные (формованные), засыпные (набивные), обертывающие (ватные) изоляционные материалы. В соответствии со свойствами и структурой материалов применяют теплоизоляционные конструкции различных типов (рис. 13-7).

Изолируемая поверхность должна быть очищена от грязи и ржавчины. Если имеется опасность конденсации влаги на поверхности, желательно покрыть ее антикоррозионным слоем.

Из порошкообразных теплоизоляционных материалов — асбослюдающей массы, асботермита, новоасбозурита, ньювеля, совелита и др. — для тепловой изоляции готовится мастика. Будучи затворены водой, эти материалы образуют пластичную массу, удобно наносимую на изолируемую поверхность и способную после просушки затвердевать в прочный теплоизоляционный слой. При нанесении мастичных материалов изолируемая поверхность должна быть нагрета, а вода, применяемая для затворения, должна иметь по возможности низкую температуру, так как это обеспечивает высокое качество изоляции. Теплую воду применяют для затворения массы только в зимних условиях. Мастику наносят на поверхность постепенно, слоями толщиной 10—12 мм по мере их высыхания. Для получения на слое изоляции прочной защитной корки последний (заделочный) слой наносят массой более густой консистенции.

Формованные (штучные) изделия для тепловой изоляции применяются различной конфигурации: для плоских поверхностей — кирпичи, плиты и прямоугольные блоки, а также специальные скорлупы и сегменты. Для закрепления штучных изделий на изолируемой поверхности часто устанавливают крепежные приспособления в виде крюков, штырей, скоб, колец, уголковых упоров,

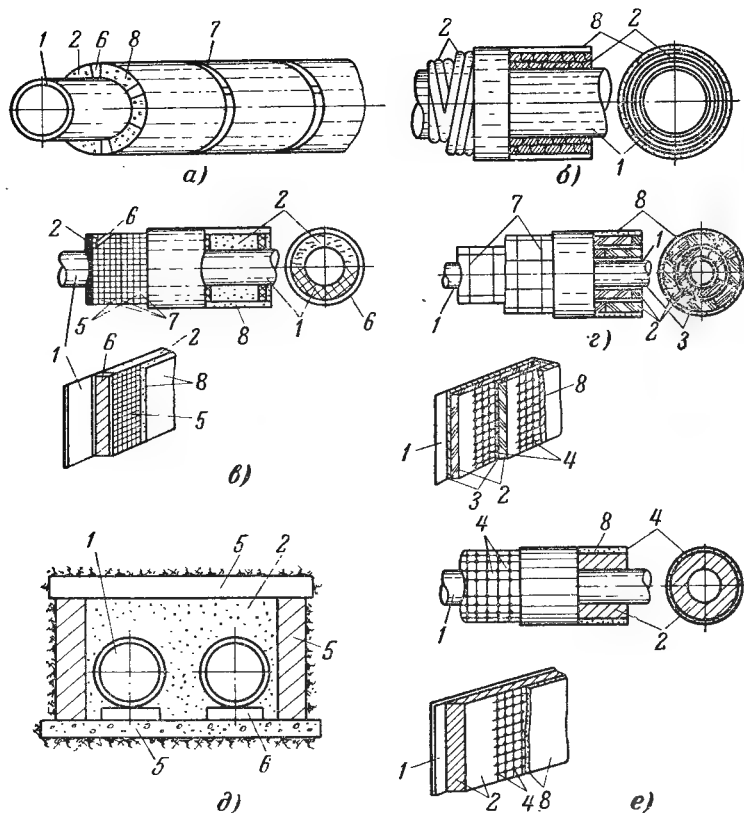


Рис. 13-7. Виды теплоизоляционных конструкций.

a — сборная; *б* — оберточная; *в* — набивная; *г* — из формованных изделий; *д* — литая; *е* — мастичная; *1* — изолируемая поверхность; *2* — теплоизоляционный слой; *3* — подмазка; *4* — каркас; *5* — внешняя ограждающая стенка; *6* — опоры; *7* — металлические крепежные кольца; *8* — отделочный слой.

струн и др. По мере укладки штучные изделия временно обвязывают резиной, а затем закрепляют проволокой. Швы и поверхность каждого штучного слоя обмазывают мастикой.

При производстве изоляционных работ засыпные (набивные) конструкции удобны тем, что могут изготавливаться в сухом виде при любой конфигурации аппаратуры. Засыпные мелкозернистые материалы (торфяная крошка, обожженный вермикулит и др.), а также волок-

нистые материалы (минеральная вата, пенька и др.) наносятся на изолируемую поверхность путем утрамбовки в ограждающем устройстве. Для предохранения изоляционного слоя от самоуплотнения при сотрясениях и вибрациях, а также от усадки под действием веса ограждающих устройств и наружного (отделочного) слоя устанавливают опоры, фиксирующие положение отдельных слоев изоляции и ограждающих стен. По окончании набивки пояса изоляции ограждающую стенку стягивают бандажами из полосовой стали или проволочными кольцами и прикрепляют их к крепежным деталям.

Обертывающие материалы применяют в виде заготовленных по форме поверхности матрацев или рулонов, наматываемых на поверхность несколькими слоями.

Для предупреждения появления трещин в тепловой изоляции оставляют температурные швы, заделываемые асбестовым шнуром или другими мягкими материалами. Для оклейки и обшивки применяют миткаль, марлю, бязь, мешковину и другие хлопчатобумажные ткани. В качестве клеящих веществ используют крахмал, казеин, белую глину и др.

Продолжительность службы изоляционной конструкции в нормальных эксплуатационных условиях составляет: мастичных — 5—10 лет; формованных — 6—8 лет; засыпных — 3—4 года; обертываемых — 5—8 лет. Срок службы тепловой изоляции можно увеличить оштукатуриванием ее магнезиальной мастикой, оклейкой или обшивкой тканью. Для удлинения срока службы оберточного слоя и для предохранения ткани и изоляции от разрушения их покрывают защитным слоем — масляной краской или битумом, а иногда и металлическим кожухом. Если по местным условиям металл теплообменных установок может разрушаться под изоляцией, последняя должна быть съемной.

13-5. РЕГИСТРАЦИЯ И ОСВИДЕТЕЛЬСТВОВАНИЕ АППАРАТОВ И СОСУДОВ

Приемка в эксплуатацию теплоиспользующих установок

Сосуды и аппараты, находящиеся в эксплуатации и подлежащие инспектированию органами Госгортехнадзора, должны периодически подвергаться инспекторским

техническим освидетельствованиям в следующем порядке:

1. Наружный осмотр производится не реже 1 раза в год во время работы аппарата без предупреждения администрации предприятия о времени осмотра. Наружным осмотром определяется состояние аппарата, арматуры, предохранительных и измерительных устройств, правильность его обслуживания, уровень знаний обслуживающего персонала.

2. Внутренний осмотр производится не реже 1 раза в 3 года. При этом выявляется состояние внутренних и наружных поверхностей аппарата или сосуда и его сварных и заклепочных швов, а также действие среды на стенки сосуда. Если конструкция аппарата не позволяет производить внутренний осмотр, сосуд должен быть подвергнут гидравлическому или иному испытанию на прочность и плотность.

3. Испытание на прочность и плотность производится не реже 1 раза в 6 лет с предварительным внутренним осмотром.

Сроки инспекторского освидетельствования могут быть сокращены в зависимости от состояния сосуда. Если сосуд подвергался ремонту с установкой заплат, заменой листов или устранением выпучин либо более года находился в бездействии, то до пуска в работу он должен быть подвергнут досрочному внутреннему осмотру и гидравлическому испытанию.

Сосуды и аппараты, рабочая среда которых представляет опасность для здоровья людей, кроме обычных освидетельствований, подвергаются испытанию на герметичность инертным газом, давление которого на 5% превышает рабочее давление. Администрация предприятия результаты этого испытания заносит в специальный журнал после каждого вскрытия сосуда, но не реже 1 раза в год. Во всех случаях проведения гидравлических испытаний сосуда или аппарата вместе с ними испытываются относящиеся к ним арматура, трубопроводы и вспомогательное оборудование.

Каждой теплоиспользующей установке должен быть присвоен порядковый номер, который должен быть отчетливо обозначен на фронте установки. Вентиляторы, калориферы, электродвигатели и другое вспомогательное оборудование должны иметь номер той установки, с которой они связаны технологическим процессом.

Теплоиспользующие установки, законченные монтажом и прошедшие испытание Госгортехнадзором на прочность и плотность, вводят в промышленную эксплуатацию после приемки их приемочными комиссиями согласно действующим инструкциям. Акт, составленный в результате приемки оборудования, должен быть утвержден организацией, назначившей комиссию.

Принимаемые в эксплуатацию тепловые установки должны быть выполнены в соответствии с проектом и отвечать: требованиям технической эксплуатации, правилам Госгортехнадзора, правилам пользования тепловой энергией, а также нормам по технике безопасности и противопожарной технике. Перед пуском в эксплуатацию теплоиспользующей установки приемочной комиссии должны быть представлены следующие документы:

1) утвержденный технический проект установки с расчетами и объяснительной запиской, согласованный с энергоснабжающей организацией в части соответствия проектного решения выданным техническим условиям на присоединение;

2) исполнительные чертежи и схемы установки со всеми трубопроводами на них под номерами, арматурой и контрольно-измерительными приборами;

3) сводная инвентарная опись оборудования установки;

4) ведомость имевших место отклонений от утвержденного проекта с объяснением причин этих отклонений;

5) паспорт и протокол испытаний оборудования на заводах-изготовителях (если они производились), осмотров и пробных пусков;

6) протоколы гидравлических и тепловых испытаний, проведенных после окончания строительно-монтажных работ на месте установки;

7) шнуровые книги (на оборудование и трубопроводы, подлежащие проверке Инспекцией Госгортехнадзора) с записью инспектора о разрешении на ввод в эксплуатацию;

8) инструкция по эксплуатации и ремонту оборудования;

9) положение о правах и обязанностях должностных лиц, обслуживающих установку;

10) формы технической отчетности и учета.

Полный комплект схем и чертежей тепловых установок хранится в техническом архиве. Оперативные схе-

мы и чертежи установок должны находиться у начальника цеха и ответственного дежурного. До сдачи оборудования в эксплуатацию необходимо создать запас эксплуатационных, ремонтных и аварийных материалов и запасных частей, а также подготовить обслуживающий персонал.

Перед вводом в промышленную эксплуатацию должны быть произведены:

- 1) длительное опробование, наладка и освоение установленного оборудования;
- 2) необходимые тепловые и технологические испытания оборудования для определения надежности, производительности, экономичности и соответствия работы установки гарантийным и проектным данным;
- 3) устранение дефектов, эксплуатационных неудобств и недоделок, обнаруженных приемочной комиссией и обслуживающим персоналом;
- 4) тепловая изоляция и окраска основного оборудования и трубопроводов.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Назовите группы оборудования и правила длительного хранения его на складе.
2. Перечислите основные операции сборки теплоиспользующего оборудования на месте эксплуатации.
3. Назовите виды испытания сосудов на плотность и прочность и поясните их сущность.
4. Назначение тепловой изоляции и основные свойства теплоизоляционных материалов.
5. Как классифицируют теплоизоляционные материалы?
6. Основные виды теплоизоляционных конструкций и продолжительность их службы.
7. Назовите основные виды и сроки освидетельствования сосудов и аппаратов инспекцией Госгортехнадзора.
8. Перечислите основные правила приемки теплоиспользующего оборудования в эксплуатацию.

Глава четырнадцатая

ЭКСПЛУАТАЦИЯ, РЕМОНТ И ОХРАНА ТРУДА ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

14-1. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

Обязанности дежурного персонала

Техническое руководство эксплуатацией теплоиспользующих установок осуществляется главным энергетиком или главным механиком предприятия, непосредственное

обслуживание оборудования — эксплуатационным персоналом цеха. Эксплуатация теплоиспользующих установок ведется по инструкциям, утвержденным главным инженером предприятия.

В инструкциях указываются: права, обязанности и ответственность эксплуатационного персонала, порядок обслуживания оборудования при нормальной эксплуатации и при авариях, порядок осмотра и ремонта оборудования, мероприятия по технической безопасности и противопожарной технике. Инструкции должны ежегодно пересматриваться с учетом изменений в схемах сетей и оборудования, а также во вновь изданных циркулярах.

К дежурному эксплуатационному персоналу относятся работники промышленного предприятия, обслуживающие посменно вверенные им теплоиспользующие установки. Дежурный персонал должен работать по графику, утвержденному начальником цеха.

При приемке смены дежурный обязан:

а) ознакомиться с производственным заданием, ходом технологического процесса, состоянием и режимом работы оборудования, арматуры и приборов на своем участке и произвести личный осмотр их в объеме, установленном должностной инструкцией;

б) выяснить у сдающего смену, какое оборудование находится в резерве или в ремонте и за каким оборудованием должно быть установлено особо тщательное наблюдение;

в) проверить чистоту рабочего места (оборудования и помещения);

г) проверить и принять инструмент, материалы, ключи от помещений, журналы и ведомости;

д) прочесть в журналах записи и распоряжения за период после своего последнего дежурства;

е) оформить приемку и сдачу смены записью в журнале или в ведомости за подписями сдающего и принимающего смену;

ж) сообщить непосредственному начальнику в смене о вступлении на дежурство и о всех недостатках, замеченных при приемке смены.

Приемка и сдача смены во время ликвидации аварий, производства операций по пуску и остановке оборудования запрещается, а при неисправном тепловом оборудовании допускается только с разрешения начальника цеха или главного энергетика предприятия.

Во время своего дежурства дежурный должен обеспечивать экономичный и надежный режим работы теплового оборудования в соответствии с утвержденным технологическим режимом, оперативными требованиями и производственной программой. При нарушении режима работы или аварии теплового оборудования дежурный обязан немедленно самостоятельно принять меры к восстановлению нормального режима работы оборудования или ликвидации аварийного состояния, используя подчиненный ему персонал, и немедленно сообщить о происшедшем непосредственному начальнику смены. В случае неправильных действий дежурного эксплуатационного персонала представители администрации, ответственные за оборудование, обязаны вмешаться в ликвидацию аварии вплоть до отстранения дежурного и принятия на себя руководства дальнейшим ходом ликвидации аварии и ответственности за него.

Соблюдение эксплуатационного режима

Для соблюдения правильного эксплуатационного режима теплоиспользующих установок необходимы:

- 1) исправность и бесперебойность работы оборудования;
- 2) высокий уровень квалификации обслуживающего персонала;
- 3) обеспеченность необходимыми видами энергии и рациональное ее расходование.

Для бесперебойной работы оборудования необходимы: достаточный резерв основного и вспомогательного оборудования и соблюдение правил технической эксплуатации; своевременное выполнение планово-предупредительных ремонтов оборудования и наличие запасных частей для быстроизнашивающихся узлов и деталей.

Для обеспечения рациональных условий эксплуатации необходимо механизировать обслуживание и ремонт теплоиспользующих установок, а также обеспечить тепловой контроль и автоматическое регулирование процесса, в частности: а) пуск и остановку основного и вспомогательного оборудования; б) поддержание регулируемых параметров постоянными или изменение их по заданному режиму; в) защиту и блокировку оборудования.

Каждый работник из состава дежурного персонала до назначения его на самостоятельную работу по обслу-

живанию теплоиспользующих установок или при переводе на другую работу проходит производственное обучение на курсах и на рабочем месте, а затем сдает экзамен по технической программе для данной квалификации. Программа должна содержать правила технической эксплуатации и ремонта оборудования, правила техники безопасности и противопожарной техники, должностные инструкции и положения о правах и обязанностях. После проверки знаний назначаемый на должность дежурного работник должен пройти стаж исполняющего обязанности (дублера) по месту работы под наблюдением и руководством высококвалифицированного работника.

В процессе работы эксплуатационный персонал должен повышать свои технические знания и периодически, не реже 1 раза в год, подвергаться проверке знаний квалификационной комиссией. Комиссия составляется: для эксплуатационного рабочего персонала — в составе начальника цеха, инженера по технике безопасности и лица, руководящего производственным обучением; для инженерно-технических работников — в составе главного энергетика или главного механика, начальника цеха, инженера по технике безопасности и лица, руководящего производственным обучением; для главных энергетиков и главных механиков — в составе главного инженера предприятия, представителя энергосистемы или ведомства и технического инспектора ЦК профсоюза. Результаты технической проверки знаний фиксируются составлением протоколов и выдачей удостоверений работникам о присвоении им квалификации.

Для обучения способам и приемам быстрого предупреждения и ликвидации неполадок и аварий рекомендуется проведение противоаварийных тренировок на рабочих местах.

Надежность энергоснабжения теплоиспользующей установки обеспечивается бесперебойной и безаварийной работой энергоснабжающих агрегатов и предприятий (ТЭЦ, котельной, воздухоудвонной, кислородной и насосной станций и др.), а также соблюдением графиков выработки и отпуска потребителям электроэнергии, пара, воды, сжатого воздуха, газа, кислорода и т. д.

Теплообменные аппараты должны работать при оптимальном тепловом режиме, обеспечивающем высокое качество продукции при максимальной производитель-

ности и минимальном расходе тепла и других видов энергии. Оптимальный тепловой режим теплообменных агрегатов устанавливают на основании тепловых испытаний. Расход тепла и других видов энергии должен оцениваться с учетом максимального использования отходов производства, выделяемых в виде вторичных энергетических ресурсов.

Теплотехнические испытания установок

Для определения соответствия эксплуатационных показателей установки проектным по потребляемой тепловой энергии, выходу готового продукта и тепловым и материальным потерям, а также для выявления показателей, необходимых для планирования и составления калькуляции себестоимости продукции и составления теплового и материального балансов, производят приемочные, а также эксплуатационные теплотехнические (технологические) испытания установки. Такие испытания позволяют анализировать и оценивать работу установки, отдельных агрегатов и цеха, а также разрабатывать на их основе рациональные энерготехнологические режимы, тепловые балансы и схемы энергоснабжения цеха и предприятия.

Перед началом испытания в точках, предусмотренных схемой испытания, устанавливают контрольно-измерительные приборы. Все приборы перед испытанием проверяют. К началу испытания подготавливают и инструктируют обслуживающий и специально привлеченный персонал. Испытание начинают тогда, когда аппарат или установка работает при установившемся режиме.

В процессе испытания производят следующие измерения и наблюдения:

1. Измерение количества и наблюдение за качеством продукта в начальных и конечных, а в некоторых случаях и в промежуточных точках его движения. Для составления материального баланса необходимо отбирать пробы продукта с целью определения его влажности, концентрации, консистенции, объемного веса и других характеристик.

2. Измерение количества пара, горячей и холодной воды, газа и других энергоносителей. Для капельных жидкостей, кроме диафрагменных приборов и расходомеров, можно пользоваться объемными устройствами в виде мерных баков.

3. Измерение давления греющего и вторичного пара, воздуха, газов и др., а также температуры энергоносителей и технологического продукта.

4. Измерение электрических величин для объектов и элементов, входящих в комплекс испытываемого оборудования и потребляющих электроэнергию.

5. Измерение температуры поверхности элементов оборудования, выходящих вторичных продуктов, воздуха в помещении и вне его для определения потерь в окружающую среду и составления теплового баланса.

При технологическом испытании необходимо соблюдать следующие условия, обеспечивающие надежность получаемых результатов:

1. Продолжительность наблюдений и измерений устанавливается равной не меньше одной рабочей смены. Наиболее точные и надежные результаты дают испытания длительностью в течение суток, так как они отражают особенности работы всех смен.

2. Интервал между измерениями и наблюдениями устанавливают обычно равным 10—15 мин (температура, давление, влажность, концентрация и т. д.). Измерения специфических характеристик технологического процесса производят в некоторых случаях чаще.

3. Одновременность наблюдений. Выполнение этого важного условия, особенно при колеблющихся или пульсирующих нагрузках, может быть обеспечено устройством звонковой и световой сигнализации.

4. Дублирование основных наблюдений и измерений, что обеспечивает надежность и точность определения главных показателей. Дублирование достигают установкой одинаковых приборов в разных точках и измерениями, основанными на различных принципах или на взаимном соответствии: например, измерение расхода пара по парометру и по расходу питательной воды.

5. Систематический хронометраж отдельных процессов и операций (пуск и остановка отдельных аппаратов, взятие проб, продувка, чистка, обдувка, резкое изменение нагрузки и др.).

6. Выполнение в процессе испытания упрощенных расчетов для выявления основных результатов по данным наблюдения через 2—4 ч после начала испытания.

При обработке результатов испытания следует исключать сомнительные измерения, которые могут являть-

ся следствием случайных факторов, искажений показаний приборов и других причин; только после этого следует составлять тепловой и материальный балансы.

14.2. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ НЕКОТОРЫХ ТЕПЛОИСПОЛЬЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

Установки для подогрева жидкостей

Основная цель включения подогревателей в энергетическую или технологическую систему — достижение требуемого процессом подогрева теплоносителя или технологической среды с минимальными затратами тепла.

В большинстве случаев греющим теплоносителем в подогревателях служит водяной пар. Снижения его расхода достигают уменьшением количества подогреваемой среды (например, путем уменьшения балластных примесей, растворителей и т. п.), повышением начальной и снижением конечной температуры подогреваемой среды, снижением температуры конденсата, уменьшением тепловых потерь, повышением коэффициента теплопередачи и другими путями.

Подогреватели жидкости характеризуются такими показателями, как тепловая производительность, максимальная температура нагреваемой жидкости, номинальный расход теплоносителей, предельное допускаемое давление первичного и вторичного теплоносителей. Поэтому подогревательная установка должна быть оборудована термометрами на входящих и выходящих трубопроводах греющей и подогреваемой среды, а также манометрами и расходомерами на трубопроводах первичного и вторичного теплоносителей.

На трубопроводах готового продукта и конденсатопроводах от подогревателей предусматривают устройства для отбора проб, по которым определяется качество конденсата или иного продукта. За работой подогревательной установки наблюдают с помощью мерных или смотровых стекол. Уровень жидкости в подогревателе повышается вследствие неплотности, разрыва трубок либо засорения конденсационного горшка или дренажной шайбы, а также вследствие неисправности насоса.

В процессе эксплуатации подогревателей систематически контролируют состояние конденсатоотводчиков, предохранительных клапанов и воздухоотводящих вен-

тилей. Чтобы быть уверенным в отводе воздуха и неконденсирующихся газов, воздушный вентиль держат открытым настолько, чтобы температура отводящей трубы была около 50° С; более низкая температура указывает на то, что воздух не отводится, а более высокая — на выпуск с воздухом значительного количества пара.

Работу подогревателей регулируют по температуре или расходу теплоносителей с помощью вентиля, установленного на трубопроводе греющего теплоносителя, либо путем изменения количества обогреваемой среды. Для автоматического регулирования работы подогревателей жидкости используют импульс от термоизмерительного прибора, устанавливаемого на выходном трубопроводе, передаваемый на сервомотор, приводящий в движение впускной вентиль или задвижку.

Значительное увеличение разности температур греющего теплоносителя (пара) и выходящей из подогревателя нагреваемой жидкости может быть вызвано загрязнением поверхности нагрева или наличием воздуха в паровом пространстве. Снижение температуры нагреваемой среды может быть вызвано также тем, что часть этой среды проходит через обводную систему подогревателя. Снижение температуры подогрева среды, сопровождаемое снижением давления пара в подогревателе, происходит вследствие неисправности обратного клапана на линии отбора пара, недостаточного открытия или неисправности задвижки на этой линии.

Подогревательная установка должна обслуживаться не менее чем двумя перекачивающими (питательными) насосами, причем их характеристики должны допускать параллельную работу насосов.

Для определения изменения конечных параметров теплоносителей (температуры, расхода жидкости, теплопроизводительности) при изменении одного из начальных параметров Е. Я. Соколовым разработана методика расчета и построения тепловых характеристик рекуперативных теплообменных аппаратов. Эта методика позволяет устанавливать зависимость производительности теплообменных аппаратов от изменения различных параметров, а также оценивать показатели работы оборудования в изменившихся условиях [Л. 80].

Испарители и паропреобразователи

Испарители и паропреобразователи служат для получения вторичного пара (конденсата) заданных параметров при минимальной затрате тепловой энергии. Различие между испарителем и паропреобразователем за-

ключается в способе использования вторичного пара последней ступени. Испарители применяют для пополнения парогенераторов дистиллятом питательной воды, для получения пресной воды из морской и для других целей. Если вторичный пар испарителя подают в паровую магистраль и используют для теплоснабжения или для технологических целей, то испаритель называют паропреобразователями. В комбинированных испарительно-преобразовательных установках часть вторичного пара конденсируется и конденсат используется для питания парогенераторов, другая часть вторичного пара направляется потребителям. Греющим теплоносителем в испарителях и паропреобразователях служит обычно водяной пар из отборов паровых турбин.

Для увеличения количества конденсата в испарительных установках вторичный пар предшествующего аппарата используется в качестве греющего пара в последующем аппарате. Расход первичного пара на выработку 1 т конденсата в одноступенчатом аппарате составляет 1,1—1,2 т, в двухступенчатом — 0,6—0,7 т и в трехступенчатом — 0,4—0,5 т. Паропреобразователи выполняют обычно одноступенчатыми, хотя конструктивно и по принципу работы они не отличаются от испарителей.

Правильный режим питания и продувки испаритель-

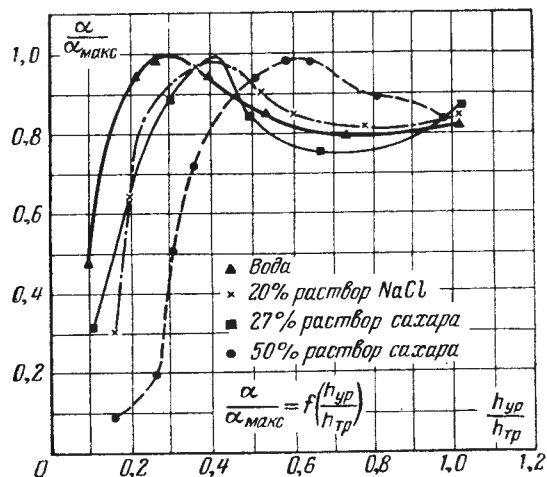


Рис. 14-1. Изменение коэффициента теплоотдачи при кипении в зависимости от уровня кипящей жидкости.

ных установок имеет целью избежать образования накипи, вспенивания и уноса влаги с паром и попадания воздуха в конденсирующийся пар, а также обеспечивать работу установки с проектной производительностью. Для поддержания оптимального режима испарительной установки предусматривают автоматические регуляторы питания, уровня и давления. Отклонение уровня кипящей жидкости от оптимального влияет отрицательно на коэффициент теплоотдачи в испарителе. По опытам В. И. Толубинского относительное изменение коэффициента теплоотдачи при кипении в зависимости от уровня жидкости колеблется в пределах от 0,1 до 1 (рис. 14-1).

При оптимальном уровне кипящей жидкости многоступенчатые испарители целесообразно питать путем последовательной подачи жидкости через первый корпус во второй, затем в третий и т. д. с продувкой через последний корпус. При таком питании наибольшая концентрация солей получается в последнем корпусе, а наименьшая — в первом. При питании многоступенчатой установки в обратном порядке, т. е. через корпус с наименьшим давлением к корпусу с наибольшим давлением, можно получить лучший результат работы установки благодаря концентрированию солей в первом корпусе, где легче обеспечить минимальное напряжение зеркала испарения. Однако для этого между аппаратами нужно установить перекачивающие насосы.

Для уменьшения уноса влаги стремятся к снижению напряжений зеркала испарения и парового объема. Напряжение зеркала испарения не должно превышать $1500\text{--}3000 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$, а парового объема — $1500\text{--}2500 \text{ м}^3/\text{м}^3 \cdot \text{ч}$. Уменьшение уноса влаги достигается также повышением качества питательной воды, размывом

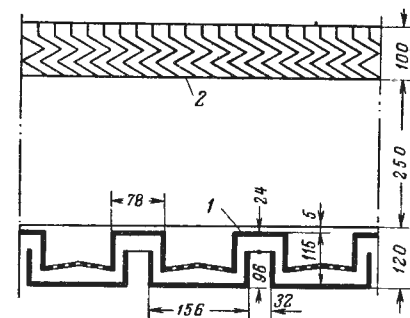


Рис. 14-2. Устройство ЦКТН для барботажной промывки пара.

1 — промывочное устройство; 2 — пластинчатый сепаратор

лены и хорошо организованной продувкой. Продувка испарителей и паропреобразователей регламентируется в зависимости от жесткости питательной воды. Периодическая продувка испарителей производится 1 раз в смену. Непрерывную продувку осуществляют с таким расчетом, чтобы не превышать допускаемой концентрации солей и щелочности в воде; при этом доля продувки должна находиться в пределах 5—15% (при морской воде до 50%) от общего количества питательной воды.

Удаление воздуха из испарителей и паропреобразователей способствует интенсивности теплопередачи. Оно осуществляется посредством постоянной или периодической продувки воздуха через паровое пространство вторичного пара из мест наибольшей его концентрации в паровой камере.

Чистотой вторичного пара определяются скорость образования накипи и интенсивность коррозии в паропотребляющих установках. Поэтому испарители и паропреобразователи необходимо питать деаэрированной водой, а образующийся вторичный пар промывать и сепарировать. На рис. 14-2 показана барботажная промывка пара. Пар проходит через слой питательной воды, подаваемой на дырчатый лист 1. В результате соприкосновения на листе воды и пара вынесенные с паром капельки воды с высокой концентрацией солей растворяются в питательной воде с меньшей их концентрацией, вследствие чего концентрация солей в паре уменьшается. После промывки пар поступает для отделения влаги в жалюзийный сепаратор 2, основанный на смачиваемости металла влагой, или в сепаратор, основанный на ином принципе (см. рис. 8-5).

Выпарные установки

Оптимальный режим работы выпарной установки обеспечивает получение в заданном количестве концентрированного раствора из последней ступени и вторичного пара нужных параметров из промежуточных корпусов при минимальной затрате тепла. Расход острого пара, греющего первый корпус, обычно минимален при максимально возможном отборе необходимого количества вторичного пара для подогрева слабого раствора из корпусов, находящихся ближе к концу выпарной установки.

Для обеспечения оптимального режима работы выпарной установки необходимо:

1) поддерживать заданное давление греющего пара с колебаниями не более $\pm 0,1$ ат;

2) поддерживать предусмотренное технологическим процессом распределение температур и давлений по корпусам выпарной установки;

3) осуществлять непрерывный отвод конденсата из греющих камер выпарных аппаратов и проверять его качество;

4) обеспечивать непрерывное питание выпарной установки раствором, подогретым до температуры, близкой к температуре кипения;

5) проводить нормальный перепуск раствора из одного корпуса в другой и систематически отводить из последнего корпуса готовый продукт, поддерживая установленный уровень растворов в аппаратах;

6) иметь минимальные потери растворов, концентратов и теплоносителей;

7) поддерживать заданное разрежение в выпарных аппаратах, работающих под вакуумом, и в случаях ухудшения вакуума немедленно выявлять причины и устранять их; поддерживать в пределах, заданных технологическим режимом, температуру воды, отводимой из барометрического конденсатора;

8) не реже 1 раза в смену удалять из греющих камер воздух и неконденсирующиеся газы через вытяжные трубы;

9) соблюдать график и порядок промывки выпарных аппаратов, а при необходимости производить внеочередные промывки и очистку аппаратов от накипи;

10) обеспечивать непрерывную работу приборов теплового контроля и автоматического регулирования, а также исправное состояние и безотказную работу арматуры и вспомогательного оборудования выпарной станции.

Выпарные установки оснащают следующими приборами теплового контроля и автоматического регулирования: паромером и манометром на цеховом паропроводе, автоматическими регуляторами давления греющего пара, манометрами и вакуумметрами на греющих камерах и на кожухе парового пространства всех корпусов, автоматическими регуляторами уровня раствора, указывающими и сигнализирующими вакуумметрами на трубопроводах от барометрических или поверхностных конденсаторов,

термометрами на всех выпарных аппаратах, подогревателях, барометрическом или поверхностном конденсаторе, водомером для учета расхода воды, поступающей на установку или в цех, расходомером для учета раствора, поступающего на выпарку, и предохранительными клапанами по первичному и вторичному парам, если их давление превышает атмосферное.

Для контроля за непрерывным отводом конденсата, а также за его качеством устанавливают водомерные стекла, пробные краны, сигнализирующие солемеры и другие приборы.

Многокорпусная установка регулируется паровым вентилем, установленным на трубопроводе пара, греющего первый корпус, и промежуточными вентилями на трубопроводах промежуточного продукта между корпусами. Дополнительное регулирование может осуществляться изменением разрежения в последнем корпусе посредством дроссельного клапана на паровой коммуникации к конденсатору или изменением расхода холодной воды, поступающей в конденсатор. Температуры в отдельных корпусах самоуставляются соответственно величине поверхности нагрева, количеству выпаренной воды и коэффициенту теплопередачи данного корпуса.

Автоматическое регулирование выпарной станции может осуществляться: в зависимости от плотности выходящего продукта — воздействием на вентиль греющего пара первого корпуса, передаваемым от вентиля, подающего продукт, или в зависимости от температуры в других корпусах — перепускными вентилями на паровой коммуникации этих корпусов и автоматическими регуляторами постоянства уровня в отдельных корпусах.

Особенности обслуживания выпарных установок. Перед началом выпаривания установка подвергается горячей пробе на воде для проверки в горячем состоянии герметичности аппаратов, арматуры, трубопроводов, конденсатоотводчиков, приборов теплового контроля и автоматического регулирования, для проверки исправности дренажей, конденсатора и воздушных насосов, а также для устранения всех обнаруженных дефектов. Проба выпарной станции на горячей воде продолжается несколько часов. Во время горячей пробы подтягивают болтовые и резьбовые соединения.

Для заполнения корпусов водой последний из них соединяют с конденсатором и пуском вакуум-насоса со-

здают в нем вакуум. Открывая вытяжные трубы, создают равномерный перепад давлений между корпусами, что способствует перетеканию воды самотеком последовательно из первого корпуса к последнему. Одновременно с этим в паровую камеру первого корпуса подают острый пар; образующийся вторичный пар подают в греющую камеру второго корпуса и т. д. до конденсатора, куда вместе с поступлением пара из последнего корпуса подается охлаждающая вода.

После устранения дефектов установку в том же порядке заполняют слабым раствором и пускают в работу.

Не разрешается подавать пар в выпарные аппараты, не заполненные водой или раствором, пускать холодную воду или холодный раствор в горячую греющую камеру, и резко повышать температуру, а также быстро повышать или снимать вакуум в аппарате.

По мере упаривания раствора его уровень в корпусах опускается ниже нормального. Пополнение корпусов раствором начинают с последнего корпуса, подавая в него раствор из предыдущего. Так пополняются до нормального уровня все аппараты вплоть до первого, куда слабый раствор подается из расходного бака с помощью насоса. Когда в последней ступени раствор достигнет нужной плотности, начинают его выпуск или откачку с одновременным пополнением раствором последовательно каждого корпуса. В дальнейшем процесс ведут так, чтобы подача раствора в первый корпус, перепуск в последующие и выпуск сгущенного раствора из последнего корпуса происходили непрерывно и равномерно.

При установившемся режиме работы выпарной станции необходимо соблюдать следующие условия, способствующие снижению расхода греющего пара и достижению максимальной производительности установки:

- 1) слабый раствор должен поступать на выпаривание равномерно, соответствовать заданной концентрации и иметь заданную температуру;

- 2) в аппаратах должен поддерживаться уровень раствора, обеспечивающий наибольший коэффициент теплоотдачи (см. рис. 14-1);

- 3) посредством регулирования вентилями на трубопроводах греющего пара необходимо поддерживать заданный перепад температур между корпусами;

- 4) по расходомерам необходимо следить за установленным по режиму отбором; превышение отборов, осо-

бенно в первых корпусах, нарушает распределение тепловой нагрузки между корпусами и температурный режим, что снижает общую производительность установки;

5) качество сгущенного раствора необходимо поддерживать на уровне не ниже заданного;

6) необходимо контролировать работу конденсатоотводчиков, отвод газов, количество и чистоту вторичного пара, разрежение в последнем корпусе и конденсаторе.

При остановке выпарной станции прекращают подачу слабого раствора в первую ступень выпарки и вместо него начинают подавать воду. Вторичный пар от испаряющейся воды служит греющим паром для упаривания раствора в последующих корпусах. Так постепенно водой наполняют все аппараты и ведут упаривание до тех пор, пока из последнего корпуса не будет удален весь сгустившийся раствор.

Если остановка произведена для промывки аппаратов, то к воде добавляют соду или соляную кислоту и в течение нескольких часов поддерживают в аппаратах кипение, после чего аппараты опоражнивают, промывают чистой водой и проветривают. При остановке на длительное время все аппараты и трубопроводы освобождают от жидкости для предотвращения разрывов при ее замерзании.

Ректификационные колонны

Постоянный режим работы ректификационных колонн обеспечивается стабильностью парообразования в дистилляционном кубе и неизменным количеством возвращаемой флегмы. Изменяя подвод тепла и подачу флегмы, можно регулировать работу колонны. Наибольшие трудности вызывает обычно поддержание паропроизводительности дистилляционного куба на необходимом постоянном уровне вследствие неизбежных колебаний давления греющего пара и связанных с этим колебаний температурного перепада на поверхности кубового нагревателя. С изменением количества образующегося в кубе пара будут изменяться расходы и скорости прохода пара и опускающейся флегмы, гидравлическое сопротивление колонны, величина поверхности контакта фаз и в конечном счете производительность колонны.

Постоянную производительность дистилляционного куба, соответствующую определенному режиму работы

колонны, поддерживают ручным или автоматическим регулированием давления греющего пара.

Степень разделения компонентов контролируется по температурам в нижней и верхней частях колонны. Температура внизу колонны должна соответствовать температуре кипения кубового остатка, а температура сверху колонны — температуре кипения дистиллята. Нашли применение и такие методы контроля, как определение плотности, определение показателя преломления, химический анализ и др. При повышенном содержании высококипящего компонента в выходящих из колонны парах необходимо увеличивать подачу флегмы. Одновременно с этим, чтобы не увеличить концентрации низкокипящего компонента в кубе, нужно увеличивать подвод тепла и интенсифицировать тем самым парообразование. Подачу флегмы регулируют на практике изменением отбора дистиллята: если конденсация паров в дефлегматоре частичная, регулирование достигается изменением количества подаваемой в дефлегматор охлаждающей воды; при полной конденсации паров — при помощи вентиля на линии отбора дистиллята.

Процесс ректификации можно регулировать и изменением количества и состава подаваемой в колонну смеси. Изменение количества смеси немедленно сказывается на количестве готового продукта, причем соответственно новому расходу должны быть отрегулированы подвод тепла и возврат флегмы. Концентрация сырой смеси прямо пропорционально влияет на концентрацию дистиллята и обратно пропорционально на температуру паров сверху колонны. Регулированием отбора готового продукта можно восстановить оптимальный режим работы колонны при новом составе исходной смеси. Отбор остатка регулируют обычно поддержанием постоянного уровня жидкости в кубе: при увеличении подачи сырой смеси или при повышении концентрации в ней высококипящего компонента следует увеличивать выпуск остатка.

Для колонн непрерывного действия целесообразно применять автоматическое регулирование процесса, причем отбор дистиллята можно поддерживать постоянным или изменять регулятором температуры в верхней части колонны; подача греющего теплоносителя управляется регулятором температуры в нижней части колонны; отбор кубового остатка определяется уровнем жидкости в кубе.

Надежная и высокоэффективная работа пароэжекторной холодильной установки определяется прежде всего ее герметичностью. При монтаже агрегатов и трубопроводов необходимо обращать особое внимание на качество уплотнений разъемных соединений. Плохая герметичность системы не только может значительно ухудшить энергетические характеристики установки, но и исключить возможность получения холода.

Перед пуском производят проверку холодильной установки и системы трубопроводов на герметичность воздухом. Аппараты, работающие под вакуумом, не рассчитаны на высокое внутреннее давление, и поэтому при испытании на герметичность давление воздуха в установке не должно превышать $1,5 \text{ ат}$ избыточных. Для эжекторных машин средней мощности (до 500—600 тыс. ккал/ч) с поверхностными конденсаторами герметичность системы считается удовлетворительной, если падение давления воздуха в системе от первоначального, равного 1 ат , не превышает $0,05 \text{ кгс/см}^2$ в течение 30 мин.

Запуск установки после проверки на герметичность начинают с пуска насоса охлаждающей воды и проверки ее циркуляции через конденсаторы. Затем подают рабочий пар на вспомогательные эжекторы, сначала второй, а потом первой ступени. По достижении вакуума в системе около 700 мм рт. ст. включают насос рабочей воды, главные эжекторы и конденсатный насос. В процессе работы установки ведут наблюдение за давлением рабочего пара, вакуумом в аппаратах, температурами охлаждающей и рабочей воды и уровнями рабочей воды в испарителе и конденсата в главном конденсаторе.

Периодически контролируют работу насосов рабочей воды и конденсатного. Отклонение от нормального режима работы этих насосов вызывается, как правило, подсосами воздуха на всасе или недостаточным уровнем воды в аппаратах, что можно обнаружить по изменению шума, создаваемого этими насосами.

Наиболее частыми неполадками в работе пароэжекторных холодильных установок являются: ухудшение вакуума вследствие недостаточной герметичности системы или засорения сопел вспомогательных эжекторов; повышение давления в главном конденсаторе вследствие нарушения герметичности или загрязнения внутренней по-

верхности конденсаторных труб; повышение температуры рабочей воды за испарителем вследствие срыва работы эжектора или засорения сопел главных эжекторов; гидравлические удары в барометрических трубах вследствие неравномерного удаления воды из конденсаторов из-за неплотностей или загрязнений.

В качестве автоматически действующих приборов, предупреждающих повышение давления в аппаратах выше расчетного под действием давления рабочего пара, ставят обычно автоматические предохранительные клапаны или электромагнитные вентили, заблокированные с реле давления или с электроконтактными мановакуумметрами.

Остановку пароэжекторной холодильной машины производят в следующем порядке: прекращают подачу рабочего пара на главный эжектор, останавливают главный эжектор, останавливают насос рабочей воды, выключают вспомогательные эжекторы и останавливают насосы охлаждающей воды и конденсатный.

Абсорбционные холодильные установки

Перед заполнением рабочим веществом все аппараты и трубопроводы установки испытывают гидравлическим давлением на прочность, а затем давлением воздуха на герметичность.

Заполнение абсорбционной холодильной установки производят в следующем порядке. Вначале в установку вводят дистиллированную воду с растворенным в ней в количестве 0,2% антикоррозионным веществом (двухромовокислым калием, аммонием или натрием). Затем вливают жидкий аммиак. Давление в генераторе начинает при этом повышаться; по достижении примерно $1,5 \text{ ат}$ полученный водоаммиачный раствор перепускают в абсорбер, одновременно откачивая из него новую порцию дистиллята в кипятильник. Через абсорбер пропускают в это время охлаждающую воду, которая препятствует быстрому повышению в нем давления. Таким путем абсорбер заполняют до давления в нем $0,2—0,5 \text{ ат}$ и при этом периодически выпускают воздух из абсорбера и генератора, чтобы к концу зарядки удалить его из аппаратов полностью. Для заполнения аммиаком испарителя и ресивера конденсатора установку включают в работу, при этом пары аммиака отсасываются из испарителя; под действием вакуума жидкий аммиак засасыва-

ется в ресивер конденсатора и в испаритель. После заполнения жидким аммиаком ресивера конденсатора и испарителя установку выключают.

Пуск холодильной машины в работу:

1) включают охлаждающую воду в конденсатор, абсорбер и дефлегматор;

2) подают греющий пар (постепенно увеличивая) в генератор и открывают выпуск из него конденсата;

3) включают водоаммиачный насос и открывают вентиль на линии слабого раствора с таким расчетом, чтобы его уровень в ресивере оставался постоянным;

4) постепенно открывают всасывающий вентиль на трубопроводе испаритель — абсорбер;

5) открывают вентиль на трубопроводе ресивер конденсатора — испаритель; при этом уровень жидкости в ресивере должен оставаться постоянным;

6) включают насос циркуляции хладоносителя (рассола);

7) с понижением температуры рассола до оптимальной включают потребители холода.

Порядок остановки холодильной машины:

1) выключают подачу пара в генератор;

2) останавливают водоаммиачный насос;

3) прекращают подачу слабого раствора в абсорбер;

4) закрывают всасывающий вентиль на линии аммиачных паров перед абсорбером;

5) прекращают подачу жидкого аммиака в испаритель;

6) прекращают подачу воды в абсорбер, дефлегматор и конденсатор;

7) отключают потребителей холода.

Оптимальный режим и наибольший холодильный эффект достигаются поддержанием постоянных параметров греющего пара, заданных температур охлаждающей воды и кипения и конденсации холодильного агента, а также оптимальной концентрации слабого раствора [Л.10]. Основными условиями надежной работы абсорбционных холодильных установок являются своевременный и качественный ремонт водоаммиачных насосов и очистка теплопередающих поверхностей аппаратов от загрязнений. Аппараты абсорбционной установки не нуждаются в ремонте и не требуют запасных частей.

Безопасная работа абсорбционной холодильной установки при увеличении давления пара выше допустимого

должна быть обеспечена пружинными предохранительными клапанами. Ими снабжены все технологические аппараты непосредственного охлаждения: кожухотрубчатые испарители, конденсаторы, ресиверы, холодильные барабаны и другое оборудование. Предохранительные клапаны ставят выше уровня жидкого аммиака. Выкидная труба от предохранительных клапанов для выпуска паров аммиака в атмосферу должна быть выведена не менее чем на 1 м выше карниза близлежащего здания в радиусе 50 м. Конец этой трубы должен быть загнут вниз на 180°.

Конденсаторы

Для предупреждения «срыва» вакуума в конденсаторе необходимо обеспечить надежное питание электрическим током электродвигателей циркуляционных насосов, поддержание их в исправном состоянии и сохранение герметичности конденсационной установки.

Постепенное ухудшение вакуума может быть предупреждено надежным охлаждением воды в водоохлаждающих устройствах, своевременной очисткой поверхности охлаждения поверхностных конденсаторов, хорошей герметичностью конденсаторной установки и надежной работой воздухоотсасывающих устройств. Плотность конденсаторов определяют несколькими способами.

Оценка воздушной плотности по скорости ухудшения вакуума. По этому показателю плотность конденсационной установки определяют по данным табл. 14-1.

Величина нагрузки конденсатора существенно влияет на скорость ухудшения в нем вакуума, и поэтому допускаемые значения коэффициента K , оценивающего воздушную плотность конденсатора, следует относить к нагрузкам, близким к номинальной (80—100%).

Для более точной оценки воздушной плотности конденсатора по скорости падения вакуума рекомендуется следующая формула:

$$k = \frac{\Delta H}{F_k \left(\frac{D_k^{\text{ном}}}{100} + 1 \right)}, \quad (14-1)$$

где K — коэффициент, равный 25, 50 или 90 соответственно отличной, хорошей и удовлетворительной воздуш-

ной плотности; ΔH — скорость ухудшения вакуума, мм рт. ст./мин; d_k — удельная паровая нагрузка, кг/м² · ч; F_k — поверхность охлаждения конденсатора (по паровой стороне), м²; $D_k^{\text{ном}}$ — количество пара, пропускаемого через конденсатор, т/ч.

Оценка воздушной плотности по изменению количества воздуха, проникающего в конденсатор. Метод контроля воздушной плотности конденсационной установки по этому показателю наиболее надежен. Для этой цели эжекторы снабжаются

Таблица 14-1

Оценка воздушной плотности конденсаторов

Оценка плотности	Скорость ухудшения вакуума ΔH , мм рт. ст./мин	
	Расход пара 50—100 т/ч	Расход пара 100 т/ч и более
Отличная	2—3	До 1
Хорошая	3—5	1—3
Удовлетворительная	5—8	2—3

иногда измерительными диафрагмами, расположенными на выходе паровоздушной смеси. При таком методе контроля воздушная плотность оценивается по следующей формуле:

$$K_1 = \frac{G_v}{\frac{D_k^{\text{ном}}}{100} + 1}, \quad (14-2)$$

где K_1 — коэффициент, равный 1, 2 или 3,5 соответственно отличной, хорошей и удовлетворительной воздушной плотности; G_v — количество воздуха, удаляемого из конденсатора эжекторами, кг/ч; $D_k^{\text{ном}}$ — количество пара, пропускаемого через конденсатор, т/ч.

Основной причиной ухудшения вакуума является загрязнение поверхности охлаждения отложениями неорганических солей и органических веществ, растворенных в воде, а также ее механических примесей. При разомкнутом цикле водоснабжения следует ожидать загрязнения преимущественно органическими веществами и механическими примесями; при обратном водоснабжении загрязнения бывают преимущественно солевые. Для уменьшения отложения органических загрязнений применяют

хлорирование воды. Отложение на стенках в системах обратного водоснабжения предупреждают продувкой циркуляционной системы, а также фосфатированием, ркарбонацией, катионированием и известкованием воды.

14-3. РЕМОНТ ТЕПЛОИСПОЛЗУЮЩИХ УСТАНОВОК

Виды и организация ремонтов

Регулярное и качественное проведение ремонтов оборудования обеспечивает выполнение производственных планов и устранение потерь производственной мощности предприятия. Поэтому рациональная организация ремонтов имеет очень важное значение. Система планово-предупредительных ремонтов (ППР) включает мероприятия по уходу, надзору и ремонту, которые выполняются в определенные календарные сроки и подразделяются на текущий, средний и капитальный ремонты [Л.99].

1. Текущий ремонт производят с целью ухода и надзора за оборудованием в рабочем состоянии. Основные операции, выполняемые при текущем ремонте теплообменной аппаратуры, включают:

1) наружный осмотр аппарата с исправлением внешних дефектов изоляции, заменой болтов и шпилек, подтяжкой болтовых и резьбовых соединений;

2) проверку состояния арматуры и замену или ремонт ее;

3) осмотр и очистку контрольно-измерительной аппаратуры;

4) проверку и очистку конденсатоотводчиков и труб для удаления продукта;

5) осмотр и оценку состояния внутренних поверхностей аппарата через смотровые окна и люки с помощью переносной лампы;

6) осмотр приводных механизмов, двигателей и других элементов вспомогательного оборудования.

Текущий ремонт производится обычно во время перерывов в работе и в выходные дни, однако при непрерывном режиме работы текущий ремонт должен производиться при остановленном оборудовании. Текущий ремонт выполняют ремонтные бригады под руководством механика цеха, энергетика или мастера.

2. Средний ремонт предусматривает ревизию отдельных узлов и восстановление и замену изношенных

деталей. Основные операции, выполняемые при среднем ремонте:

- 1) производство работ, предусматриваемых текущим ремонтом к моменту производства среднего;
- 2) замена арматуры с проверкой предохранительных клапанов на гидравлическом прессе;
- 3) проверка герметичности трубчатки или паровой рубашки и устранение неплотностей подвальцовкой, заваркой или заглушением отдельных труб;
- 4) ревизия разъемных резьбовых, сальниковых и фланцевых соединений;
- 5) разборка и ремонт вспомогательного оборудования с восстановлением или заменой отдельных узлов и деталей;
- 6) ремонт футеровки и антикоррозионных покрытий;
- 7) ремонт изоляции и окраска поверхностей аппарата.

Кроме ремонтной бригады цеха, для выполнения средних ремонтов привлекаются специализированные бригады, включающие квалифицированных сварщиков, изоляторов, футеровщиков, слесарей-наладчиков и др.

3. Капитальный ремонт имеет целью восстановление оборудования по возможности до начального технического состояния. При капитальном ремонте производится полная разборка аппарата со снятием его с фундамента и ремонтом отдельных деталей и узлов на месте, в ремонтных цехах или предприятиях. Капитальный ремонт производится по специально разработанному плану и обеспечивается необходимыми документами и материалами (дефектными ведомостями, чертежами, запасными частями, инструментами, приспособлениями, подъемно-транспортным и такелажным оборудованием), а также рабочей силой и ремонтной площадкой.

При капитальном ремонте последовательно выполняются следующие операции:

- 1) ознакомление с чертежами и дефектной ведомостью установки; подготовка необходимых запасных деталей, инструмента, материалов и подъемно-транспортных приспособлений;
- 2) получение разрешения на отключение оборудования, подлежащего ремонту;
- 3) снятие контрольно-измерительных приборов, вскрытие аппарата и разборка его на узлы и детали;
- 4) промывка и очистка деталей;

5) отбраковка деталей методом осмотра и измерений, уточнение дефектной ведомости на ремонт и ведомости на запасные части;

6) ремонт деталей, сборка узлов, подгонка деталей и узлов;

7) сборка аппарата, включающая проверку и регулирование механизмов аппарата, опробование аппарата и устранение выявленных дефектов;

8) изготовление новых деталей и узлов, внесение усовершенствований, намеченных к реализации в период капитального ремонта;

9) проверка аппарата после сборки и регулирования, подготовка аппарата к испытанию в рабочем состоянии и опробование его на холостом ходу;

10) испытание аппарата по техническим условиям и сдача его в эксплуатацию с проведением испытания аппарата на герметичность, нагревом аппарата, залитого водой, а также испытанием всех движущихся механизмов в течение одной рабочей смены;

11) завершение выполненного капитального ремонта актом о передаче оборудования в эксплуатацию.

Текущий и средний ремонты финансируются за счет оборотных средств предприятия, а капитальный ремонт за счет амортизационных отчислений.

Кроме планово-предупредительных, бывают ремонты аварийные и восстановительные. Аварийный ремонт вызывается повреждением деталей агрегата. Восстановительный ремонт заключается в ремонте и замене изношенного оборудования, дальнейшая эксплуатация которого нецелесообразна, и выполняется за счет специально выделенных средств.

Ремонт теплоиспользующего оборудования может производиться индивидуальным методом, при котором все детали и узлы агрегата ремонтирует, как правило, одна бригада, производя ремонтные работы в пределах ремонтных мастерских технологического цеха.

При агрегатном методе ремонта неисправные узлы и детали аппарата заменяют отремонтированными или новыми. При агрегатном методе сокращается время ремонта, работы по ремонту могут быть полнее специализированы, повышается производительность труда.

Для проведения ремонтов различных видов вырабатывают нормы времени непрерывной работы и простоев теплоиспользующей аппаратуры и вспомогательного

оборудования. Графики ремонта теплоиспользующих установок согласовываются с графиками ремонта соответствующего производственного оборудования энергоснабжающей организации и утверждаются главным энергетиком, главным механиком или главным инженером предприятия.

Одновременно со средним и капитальным ремонтом теплоиспользующих установок производится ремонт относящегося к ним вспомогательного оборудования.

В случае необходимости во время ремонта снимают эскизы для пополнения альбома чертежей запасных частей оборудования и составляют недостающие схемы тепловых проводов. Изменения, выявленные и произведенные во время ремонта, вносятся в паспорта, схемы и чертежи оборудования.

Некоторые ремонтные работы. Устранение неполадок и аварий

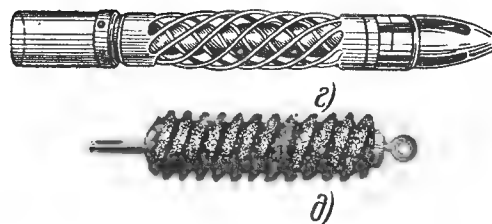
Очистка поверхностей нагрева в теплообменниках. Продолжительность работы аппарата между чистками зависит от скорости загрязнения поверхности нагрева и от допускаемой степени загрязненности; эта продолжительность устанавливается опытным путем и может составлять от нескольких суток до нескольких месяцев. В зависимости от структуры загрязняющего слоя и степени загрязненности, а также в зависимости от типа аппарата для очистки металлических поверхностей нагрева применяют механический, гидравлический или химический метод [Л.7, 106]. В настоящее время внедряется ультразвуковой метод очистки накипи в теплообменных аппаратах и котлах. Для удаления твердой накипи с поверхности труб часто применяют термический метод очистки (см. табл. 14-2).

При мягких осадках и твердой накипи применяют механическую очистку (шомполами, шарошками, щетками, бойками, долотами, резиновыми шариками, цилиндрами и другими инструментами, рис. 14-3). Во многих случаях применяют пневматические шарошки и бойки. Гидравлическую очистку применяют для удаления с поверхности труб и с других поверхностей аппарата неприлипающих мелких осадков (песка, растений, щепы и т. п.). В некоторых случаях очистку труб производят продувкой водяным паром или сжатым воздухом. Пере-



Рис. 14-3. Приспособления для механической очистки труб в теплообменниках.

а — шарошка; б и в — волосяные щетки; г — металлический ерш; д — проволочный ерш; е — резиновый шарик в трубе; жс — резиновый цилиндр.



численные методы очистки связаны с частичной или полной разборкой теплообменника и с большой затратой труда.

Несколько лет назад в ГДР была применена очистка труб конденсаторов во время работы турбогенератора при помощи резиновых шариков. Диаметр шариков из губчатой резины на 1 мм больше внутреннего диаметра трубы. Шарiki большого диаметра (на 2 мм больше диаметра трубы) применяют в тех случаях, когда допускаемый перепад давлений в трубе превышает 2 м вод. ст. Удельный вес материала шарика должен быть немного больше единицы, чтобы при определенной скорости воды в трубах и в камерах конденсатора шарики находились во взвешенном состоянии.

В конденсатор шарiki вводят так, чтобы было обеспечено равномерное распределение их по трубам. Гидродинамика потока предотвращает попадание нескольких шариков в одну трубу: сопротивление, создаваемое по-

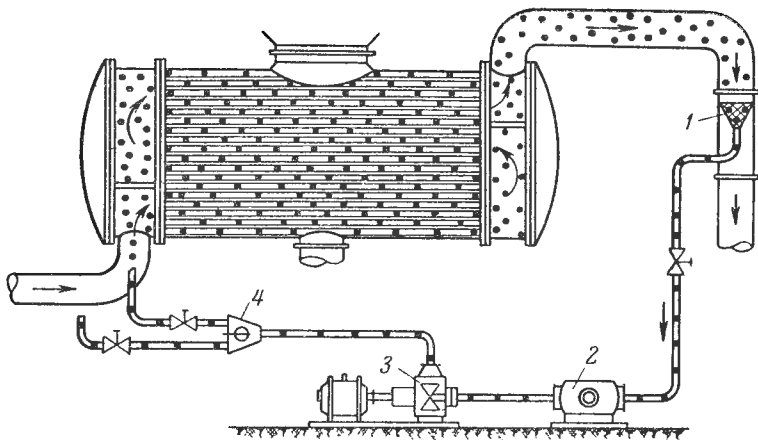


Рис. 14-4. Устройство для очистки труб конденсаторов резиновыми шариками.

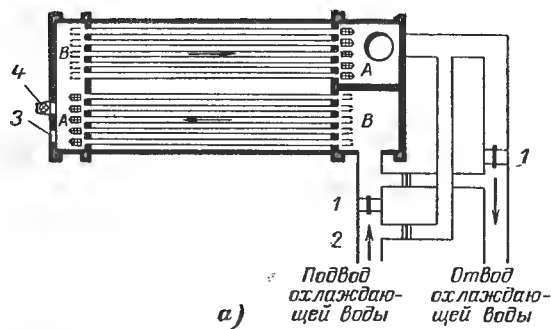
1 — сетка для улавливания шариков; 2 — ящик для ввода и вывода шариков; 3 — насос; 4 — распределитель.

павшим в трубу шариком, уменьшает скорость входа в нее воды, и поэтому следующий шарик увлекается в соседнюю свободную трубу.

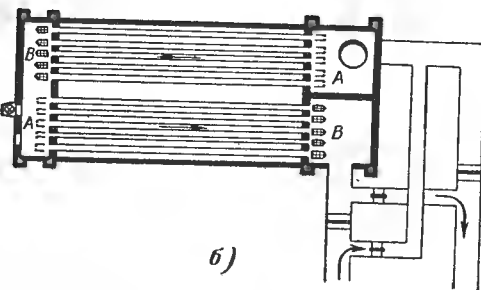
Перед пуском в работу устройства для поддержания труб в чистом состоянии с помощью шариков внутреннюю поверхность труб тщательно очищают. Устройство для очистки внутренней поверхности труб теплообменников с помощью резиновых шариков представляет собой замкнутый водяной контур, состоящий из теплообменника, сетки для улавливания шариков из общего потока охлаждающей воды, ящика для ввода и вывода шариков, насоса, распределителя и соединительных труб (рис. 14-4). Постоянная циркуляция шариков в водяном контуре поддерживается при помощи циркуляционного насоса 3, забирающего воду вместе с шариками из сетки 1 и подающего ее во входной патрубков теплообменника. Шарики проходят через трубную систему аппарата, снимают накопившийся на внутренней поверхности труб осадок, выносятся вместе с охлаждающей водой в патрубок и попадают затем в сетку для их улавливания. Сетка, изготовленная из нержавеющей стали в виде ворон-

ки, складываясь при необходимости специальным приводом, встроена в вертикальный сбросной вывод на пути потока воды, направленного сверху вниз. Между сеткой и насосом установлен ящик 2 с ситом, которое наружным приводом может быть повернуто так, что циркулирующие в системе шарики улавливаются и при необходимости удаляются из системы. В ящик закладывают также новые шарики. Если в теплообменнике имеется два входных патрубка для охлаждающей воды, то за насосом устанавливается распределитель 4. Расход воды, проходящей через циркуляционный насос, составляет 0,4% от общего расхода охлаждающей воды. Устройство для очистки труб включается в работу ежедневно на 4—6 ч. Очистка труб при помощи шариков не требует дополнительных расходов на обслуживание, так как работу выполняет дежурный персонал основного оборудования.

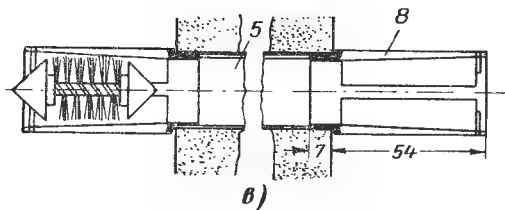
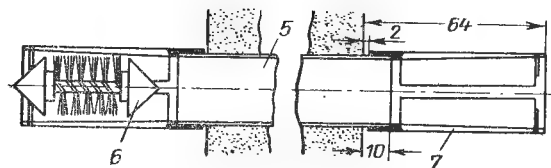
В настоящее время нашел применение новый способ механической очистки труб конденсаторов паротурбинных установок [Л.96], при котором посредством реверсирования потока воды в трубах прогоняются очищающие щетки (рис. 14-5). Для этой цели трубопроводы охлаждающей воды конденсатора были снабжены обводными трубопроводами с регулирующей арматурой. Каждая конденсаторная трубка была оборудована на обоих концах улавливающими гильзами (рис. 14-5, в). При нормальном направлении потока воды щетки удерживаются в улавливающих гильзах (рис. 14-5, а). Если же направление потока изменить на обратное, то все щетки выйдут из своих гильз в трубки и под действием имеющегося перепада давления перемещаются в улавливающие гильзы, расположенные по другую сторону трубок (рис. 14-5, б). Переключением потока воды на нормальное направление процесс повторяется, и щетки возвращаются в свое исходное положение. На этом процесс очистки заканчивается. Он может повторяться так часто, как это необходимо для обеспечения чистоты трубок. Скорость воды, при которой щетки могут выходить из улавливающих гильз и двигаться по трубкам, составляет примерно 0,6 м/сек; время движения их по трубкам в одном направлении — 2—6 сек, общее время на очистку труб — приблизительно 30 сек. Условием безукоризненной работы очистного устройства является точное регулирование работы арматуры, изменяющей направление



а)



б)



в)

Рис. 14-5. Устройство для очистки труб конденсаторов щетками.

а — поток охлаждающей воды в нормальном направлении; б — поток охлаждающей воды в обратном направлении; в — крепление улавливающих гильз; 1 — главный клапан; 2 — обратный клапан; 3 — смотровое стекло; 4 — подсветка; 5 — трубка; 6 — щетка; 7 — улавливающая гильза с насаживаемым кольцом; 8 — улавливающая гильза с вставляемым кольцом.

течения охлаждающей воды. Пластмассовые щетинки щетки должны отличаться ограниченной гигроскопичностью с малой набухаемостью. В зависимости от способа крепления трубок гильзы могут быть изготовлены в двух вариантах (рис. 14-7, в), однако в обоих случаях должна быть обеспечена плотная посадка их на трубки или в трубки.

В случаях, когда межтрубное пространство, а иногда и трубы недоступны для очистки указанными выше способами, применяют химическую очистку. В качестве реагентов для химической очистки поверхностей теплообмена применяют растворы соляной кислоты, едкого натра и хлорной извести, а также газообразный хлор (табл. 14-2).

При термической очистке, применяемой для отделения твердой накипи, теплообменник опоражнивают и все трубы обогревают паром, затем пар выключают и трубы орошают холодной водой, быстро вводимой в межтрубное пространство через питательный патрубок или по проложенным в верхней части корпуса трубам диаметром 38—50 мм с отверстиями. Вследствие резкого изменения температуры труб накипь от них отскакивает, смывается водой и удаляется через люк. Термическую очистку не следует применять при неудовлетворительной компенсации температурных удлинений труб, так как из-за резких изменений температуры последние могут деформироваться, а также может нарушиться герметичность их крепления.

Кроме периодической очистки, при проектировании и эксплуатации оборудования необходимо предусматривать профилактические мероприятия, уменьшающие загрязнение.

В теплообменных аппаратах, в которых циркуляционная вода используется для конденсации или охлаждения среды, в качестве профилактических мер против загрязнений рекомендуется продувка систем обратного водоснабжения, рекарбонизация циркуляционной воды дымовыми газами, обработка циркуляционной воды кислотой, фосфатирование, катионирование и известкование.

Для предохранения конденсаторов от органических загрязнений применяют хлорирование охлаждающей воды путем обработки ее хлорной известью. Режим хлорирования и дозировку хлора устанавливают опытным путем для каждого отдельного случая на основе определе-

Способы периодической очистки труб теплообменных аппаратов

Метод очистки	Характер загрязнений	Способ очистки
Механический	Мягкие осадки	Шомполами, проволочными щетками из латунной проволоки; проталкивание струей воды или сжатым воздухом резиновых шариков или пробок (ершей) под давлением 3—10 ат
	Очень твердая накипь	Шарошками, жесткими проволочными щетками; долотами с приводом от гибкого вращающегося вала с последующей промывкой водой. Комбинирование механического способа очистки с химическим
Химический	Углекислые соли известкового характера, отлагающиеся вследствие жесткости исходной воды	3—5%-ным раствором соляной кислоты с ингибитором (1—2 г на 1 л раствора)
	Слизь маслянистого, илистого или глинистого характера	3—5%-ным раствором едкого натра с добавкой керосина
	Загрязнения органического характера	Раствором хлорной извести с содержанием активного хлора 15—20 г/м ³ или газообразным хлором
Гидравлический	Мелкий песок	Промывка циркуляционной водой с повышенной скоростью или струей воды под давлением 10—12 ат
	Листва, щепы и т. п. на входящих концах труб (загрязнение трубных решеток)	Промывка потоком воды

Метод очистки	Характер загрязнений	Способ очистки
Термический	Очень твердая накипь	Прогрев трубок паром с последующим опрыскиванием холодной водой

ния способности воды поглощать хлор, характера и интенсивности отложений и температурного режима.

Расстройство развальцовки и ее устранение. Причинами расстройства развальцовки могут быть: низкое качество работ, неудовлетворительная компенсация температурных удлинений труб, недостаточная толщина и плохое анкерное крепление трубных решеток, приводящие к большим прогибам их в работе, хрупкость материала труб и коробление трубной решетки из-за большой разности температур в отдельных ее участках. Расстройство развальцовки легко обнаруживается при контроле качества обрабатываемого в аппарате материала, конденсата или газа. Улучшение компенсации и устранение прогиба трубных решеток достигаются путем изменения отдельных узлов аппарата; хрупкость труб, обусловленная наклепом, устраняется отжигом.

Разрывы труб и их предупреждение. Разрывы труб могут быть вызваны их вибрацией, коррозией, эрозией, гидравлическими ударами или чрезмерными внутренними напряжениями в материале труб.

Вибрация труб приводит к их истиранию и разрушению при неправильной установке поддерживающих перегородок, а также при наличии больших зазоров между трубами и стенками перегородок. Для устранения вибрации допускается расклинивание труб деревянными рейками.

Трубы корродируют обычно вследствие химической агрессивности среды или плохого удаления воздуха из парового пространства, особенно из нижней части, и «мертвых» углов, образуемых перегородками в паровом пространстве. Удаление из воды кислорода, устранение подсосов воздуха в систему и систематическая ее продувка могут несколько снизить вредное влияние агрессивной среды. Для устранения электрической коррозии в аппарате устанавливают дополнительные электроды.

Эрозия труб (разрушение струей пара) происходит обычно в участке поступления пара. Для защиты труб от эрозии против паровпускного отверстия устанавливают отбойный стальной лист — дефлектор (см. рис. 3-7).

Гидравлические удары могут возникать в аппаратах при неисправности регуляторов питания, наличии воздушных пробок в питательном трубопроводе и в подогревателях, резких переключениях задвижек в коммуникациях питательной системы и в случае местного парообразования при слабой циркуляции жидкости в трубах. Устранение гидравлических ударов достигается правильной эксплуатацией оборудования (особенно при пусках и изменениях режима), поддержанием в исправности регуляторов питания, регулярной продувкой системы и устранением лишних гидравлических сопротивлений при входе жидкости.

Внутренние напряжения в материале труб бывают обычно следствием неправильной термической обработки их на заводе. Глубокие продольные риски и канавки на поверхностях труб также могут служить причиной разрушения труб, особенно при работе в агрессивных средах.

Для обнаружения места расстроя развальцовки и труб с течью в пучке при ремонте аппарата производят опрессовку вынутого из корпуса пучка водой или создают в пучке разрежение и передвигают пламя свечи вдоль труб и по трубной решетке. Разрежение может быть создано путем присоединения к эжектору, вакуумному насосу или конденсатору.

Обнаруженные в процессе эксплуатации трубы с течью выключают, заглушив их медными пробками с небольшой конусностью. При наличии более 10% заглушенных труб их необходимо заменить новыми.

Причины пробивания прокладок во фланцах аппаратов и трубопроводов и пути их устранения. Причины образования неплотностей, свищей и раковин во фланцевых соединениях — неудовлетворительное качество прокладок, перекосы фланцев, неравномерная затяжка болтов и резкие колебания температуры или давления среды. Ремонт заключается в замене прокладки, устранении перекоса фланцев или ликвидации язвин на поверхности фланцев. Неглубокие повреждения уплотнительных поверхностей (до 1 мм) можно устранять проточкой поверхности фланцев.

При глубоких повреждениях уплотняющие поверхности перед проточкой наваривают.

Повреждения сварных стыков и их исправление. Основные причины повреждения сварных стыков — некачественная сварка, перекося корпуса аппарата из-за плохого качества монтажа или усадки фундамента, проседание опор трубопроводов, плохая компенсация и др. В зависимости от характера и степени повреждения и качества стыка место повреждения частично или полностью переваривают.

Течь в сальниках задвижек и компенсаторов и ее устранение. Причинами возникновения течи бывают обычно плохая набивка, низкое качество набивочного материала и износ уплотнительных поверхностей. Для устранения течи сальник подтягивают, а если это не помогает, отключают поврежденный участок. При остановке оборудования сменяют набивку сальника или износившиеся детали уплотнения.

Устранение аварий. Об авариях теплового оборудования, подведомственного инспекции Госгортехнадзора, администрация предприятия обязана немедленно уведомить местную инспекцию. По правилам Госгортехнадзора до прибытия инспектора администрация предприятия обязана сохранить обстановку, при которой произошла авария, если это не представляет опасности для жизни и здоровья персонала и не нарушает порядка работы предприятия. Каждая авария должна быть расследована согласно инструкции по расследованию и учету аварий и несчастных случаев, разработанной Главной инспекцией Госгортехнадзора. При расследовании аварии должны быть установлены: причины возникновения и развития аварии; виновник возникновения и развития аварии; правильность действия персонала; дефекты и характер повреждения оборудования. Кроме того, должны быть разработаны мероприятия для предотвращения подобных аварий. Противоаварийные мероприятия утверждает директор или главный инженер предприятия. Классификация аварий определяется в соответствии с действующей инструкцией.

14-4. ОХРАНА ТРУДА И ЕЕ ОРГАНИЗАЦИЯ

В СССР большое внимание уделяется вопросам охраны труда и технике безопасности на промышленных предприятиях. В статье 138 КЗОТ указано, например,

что ни одно предприятие не может быть открыто, пущено в ход или переведено в другое здание без санкции инспекции труда и органов санитарно-промышленного технического надзора. Советскими законодательными органами издан ряд законов и постановлений, в которых отражены вопросы охраны труда женщин и подростков, установлены нормативы продолжительности рабочего дня, обеспечения работающих спецодеждой и средствами индивидуальной защиты, установлены льготы для работников, занятых в производствах с вредными условиями труда.

Помимо общих законоположений в стране, разрабатываются специальные правила и нормы по технике безопасности и промышленной санитарии при производстве отдельных работ. К ним относятся, например, «Правила устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением», «Нормы расчета элементов паровых котлов на прочность» и др. Эти правила и нормы разработаны на основе действующих законодательств об устройстве и содержании промышленных предприятий, санитарных, противопожарных и строительных норм и правил (СНиП), технических условий (ТУ) и ГОСТ. Кроме того, во многих отраслях промышленности разработаны и действуют специальные правила и нормы по технике безопасности и промышленной санитарии для проектирования, строительства, монтажа и эксплуатации отдельных производств [Л.14, 20, 102].

В настоящем параграфе приведены отдельные, наиболее общие и важные положения по охране труда, которыми следует руководствоваться проектанту при разработке промышленных теплopotребляющих устройств.

Для того чтобы теплоиспользующие аппараты, работающие под давлением, не представляли опасности для обслуживающего персонала, находящегося вблизи оборудования и помещений, где аппараты установлены, должны осуществляться меры, обеспечивающие безопасность эксплуатации. В соответствии с «Правилами устройства и безопасности эксплуатации сосудов, работающих под давлением», утвержденными Госгортехнадзором СССР, теплоиспользующие установки с рабочим давлением более 0,7 ат должны быть зарегистрированы в местной инспекции Госгортехнадзора. На них должны быть заведены шнуровые книги, в которые заносятся ре-

зультаты испытания и освидетельствования аппаратов, а также изменения, которым они подвергаются.

Обслуживающий персонал обязан знать и выполнять инструкции и правила технической эксплуатации и техники безопасности и немедленно сообщать о всех замеченных им ненормальностях в работе основного и вспомогательного оборудования, а также о нарушениях правил техники безопасности.

Директора, главные инженеры, главные энергетики (механики) предприятий, начальники цехов, участков, мастерских и лабораторий обязаны обеспечить: проведение организационных и технических мероприятий для создания безопасных условий труда; инструктаж и обучение персонала безопасным методам работы и контроль за выполнением правил и инструкций по технике безопасности.

На участках, где это требуется по условиям работы, следует вывешивать плакаты по технике безопасности и предупредительные надписи: «Не включать, работают люди», «Взрывоопасно», «Осторожно, высокое напряжение», «Без противозаза не входить» и т. п.

Ответственность за несчастные случаи и профессиональные отравления на производстве несут лица административно-технического персонала, не обеспечившие соблюдения правил техники безопасности и промышленной санитарии и не принявшие мер для предотвращения несчастных случаев и случаев профессионального отравления. Каждый несчастный случай должен быть тщательно расследован, причем должны быть установлены причины его возникновения и приняты меры по предотвращению подобных случаев в дальнейшем.

Для оказания первой помощи при несчастном случае на участке, в цехе, на ремонтной или монтажной площадке должна быть аптечка с набором медикаментов и перевязочных средств.

На предприятиях и на крупных ремонтных и монтажных участках организуются постоянные или временные медицинские пункты.

Правила безопасности при эксплуатации. Все работники цеха должны быть ознакомлены с характером опасности данного цеха, знать инструкции по рабочему месту и по технике безопасности и строго их соблюдать. Инструктаж проводится не реже 1 раза в 3 месяца, а его результаты регистрируются.

Необходимо поддерживать в цехе чистоту, свободу проходов и исправность средств защиты. Кроме того, в наличии всегда должны быть средства и медикаменты для оказания первой помощи. В случае работы с токсичными материалами на рабочих местах должны быть краны с водой для смывания этих материалов. На фланцевых соединениях трубопроводов с токсичными веществами ставят защитные чехлы для предохранения от попадания капель этих веществ на тело или одежду обслуживающего персонала при повреждении прокладок.

На видном месте в производственных помещениях вывешивают инструкции по обслуживанию оборудования и технике безопасности.

В цехах с вредными материалами персонал допускается к работе только в спецодежде и с необходимыми защитными средствами (рукавицами, очками, противогазами, резиновыми сапогами или галошами и т. п.)

Категорически запрещается превышать в аппаратах и трубопроводах давление и температуру, предусмотренные инструкцией по эксплуатации и паспортом на аппарат или трубопровод. Аппаратура и трубопроводы должны быть герметичны и исправны. Движущиеся механизмы должны иметь ограждения. Смазка движущихся механизмов и набивка сальников на ходу запрещаются.

Электродвигатели включают в резиновых перчатках и в резиновой обуви с резиновым ковриком под ногами. Местное освещение и переносные лампы подключают к электросети с напряжением не более 36 в.

Большое внимание необходимо уделять безопасности хранения химических веществ. Для обеспечения безопасности при организации их хранения надлежит строго руководствоваться правилами совместного хранения опасных и ядовитых веществ, которые обладают способностью к воспламенению и загоранию от искры, открытого огня, действия воды и других причин. К таким веществам относятся: взрывчатые; способные к образованию взрывчатых смесей; самовозгорающиеся и самовоспламеняющиеся; легковоспламеняющиеся, отравляющие и ядовитые вещества, а также сжатые и сжиженные газы [Л.14].

В связи с токсичностью и взрывоопасностью аммиака особенно велика роль техники безопасности на водоаммиачных холодильных абсорбционных установках. По токсичности аммиак близок к хлору, но отличается более

сильными воспалительными и омертвляющими действиями. Предельная санитарная норма аммиака в производственных помещениях не должна превышать 0,07 мг/л. Взрывоопасные концентрации аммиака — от 16 до 28,8%. Разработаны специальные «Правила техники безопасности на аммиачных холодильных установках компрессионной и абсорбционной систем», утвержденные Госгортехнадзором, которые должны неукоснительно выполняться при обращении с аммиаком.

Правила безопасности при ремонтных работах. Ремонтные работы внутри сосудов и аппаратов производятся только по письменному разрешению начальника цеха или смены, выдаваемому лицу, ответственному за производство ремонта.

В разрешении указываются готовность оборудования к ремонту и меры безопасности при производстве ремонта.

Перед началом ремонта лицо, ответственное за его производство, знакомится с объемом, содержанием и условиями производства работ, обращая особое внимание на готовность аппаратов к ремонту (тщательность очистки и промывки, отключение электрического напряжения и проводов, заглушение от действующих коммуникаций).

Установка и удаление заглушек производятся с особой тщательностью. Неправильный подбор материала для изготовления заглушек, неточный расчет их толщины или небрежная их установка могут привести к авариям, взрывам, пожарам и несчастным случаям. Конструкция, размеры и материалы фланцевых заглушек для трубопроводов пара и горячей воды регламентированы ГОСТ 6973-59. Места установки заглушек записывают в специальный журнал по соответствующей форме [Л.14]. Все работы по установке и удалению заглушек производятся под руководством и наблюдением начальника цеха или его заместителя.

Особенно тщательно должен быть подготовлен ремонт реакционных аппаратов с ядовитыми, горючими и взрывоопасными жидкостями и газами. Все складки и щели на поверхности аппарата (особенно футерованного) просматривают, очищают и нейтрализуют остатки вредной среды.

Работы по ремонту теплоиспользующих аппаратов начинают только после их остывания или искусственного охлаждения до температуры не выше 30° С. Ремонтные

работы внутри аппарата с применением открытого огня (паяльные, сварочные и им подобные) производят только по письменному разрешению главного инженера или пожарной охраны предприятия.

Ремонтные работы внутри аппаратов производятся бригадой в составе двух или более человек, один из которых участвует в работах в качестве наблюдателя и находится вне аппарата со всем необходимым для оказания помощи работающему. Рабочие со слабым здоровьем к работе внутри аппаратов для химически вредных веществ не допускаются.

Ремонтные рабочие должны получать инструктаж по специфике ремонтных работ и по мерам безопасности; они обеспечиваются спецодеждой и обувью, а также защитными приспособлениями (очками, шлемами, противогазами — фильтрующими или с активной подачей воздуха, предохранительным поясом с ляжками и веревкой и т. п.).

При работе на высоте более 3 м и при невозможности соорудить леса рабочий обязан надеть предохранительный пояс с веревкой, надежно привязанной к опоре. Инструмент, крепежный материал и другие мелкие предметы должны переноситься и храниться на высоте в специальных ящиках или сумках.

Во время ремонтных работ должны соблюдаться меры предосторожности при подъеме и опускании тяжелых деталей и предметов.

Запрещается нагромождение деталей и посторонних предметов у места работ или в самом аппарате.

Пробивка отверстий в перекрытиях, крепление на них такелажных устройств и нагружение перекрытий деталями и предметами для ремонта разрешаются только по указанию технического персонала по строительству.

При производстве работ внутри аппаратов разрешается пользоваться электроосвещением и электроинструментами с напряжением до 12 в, при этом пользуются резиновыми перчатками и резиновыми ковриками. Запрещается работать электроинструментом, если: корпус инструмента находится под напряжением; неисправен или оголен шнур; не имеется заземляющего провода.

Запрещается становиться на ограждения, трубопроводы, кожухи муфт, подшипники, а также на конструкции и перекрытия, не имеющие специальных ограждений и не предназначенные для прохода по ним. Воспрещает-

ся перемещаться по мокрым, обледенелым или скользким переходам и конструкциям.

Для затяжки болтов нельзя применять ключи, зев которых больше размеров болта или гайки.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Каковы обязанности дежурного персонала при обслуживании теплоиспользующего оборудования?
2. Перечислите необходимые условия для соблюдения эксплуатационного режима.
3. Какие квалификационные комиссии обеспечивают необходимый технический уровень знаний эксплуатационного персонала?
4. Как производятся теплотехнические испытания установок?
5. Каковы особенности эксплуатации подогревателей жидкости?
6. Каковы особенности эксплуатации испарителей и паропреобразователей?
7. Каковы особенности пуска и эксплуатации выпарных установок?
8. Каковы особенности обслуживания реакционных аппаратов?
9. Каковы особенности эксплуатации ректификационных колонн?
10. Перечислите правила пуска и эксплуатации парожеткторных холодильных установок.
11. Перечислите правила пуска, эксплуатации и остановки абсорбционных холодильных установок.
12. Как оценивается воздушная плотность конденсаторов?
13. Каковы виды и организация ремонтов теплоиспользующих установок?
14. Каковы виды ремонтных работ при текущем, среднем и капитальном ремонтах?
15. Перечислите способы очистки поверхностей нагрева от загрязнений.
16. Как производится непрерывная очистка труб конденсаторов с помощью резиновых шариков?
17. Как обнаружить неплотности в трубчатых теплообменных аппаратах и каковы способы их устранения?
18. Перечислите основные правила техники безопасности и охраны труда при эксплуатации теплоиспользующих установок.
19. Перечислите правила техники безопасности и охраны труда при ремонте оборудования теплоиспользующих установок.

1. Аксельрод Л. С., Конструирование и расчет ситчатых ректификационных колонн, Труды ВНИИКИМАШ, вып. 1, Машгиз, 1956.
2. Альтгаузен А. П., Гутман М. Б., Малышев С. А., Свенчанский А. Д., Смоленский Л. А., Низкотемпературный электронагрев, изд-во «Энергия», 1968.
3. Альтгаузен А. П., Смелянский М. Я., Шевцова М. С., Электротермическое оборудование, Справочник, изд-во «Энергия», 1967.
4. Александров И. А., Реакционные и абсорбционные аппараты, изд-во «Химия», 1965.
5. Андреев М. М., Берман С. С., Буглаев В. Т., Костров Х. Н., Теплообменная аппаратура энергетических установок, Машгиз, 1963.
6. Андреев Н. Х., Малахов А. И., Фуфаев Л. С., Новые материалы в технике, изд-во «Высшая школа», 1968.
7. Антикайн П. А., Аронович М. С., Бакластов А. М., Рекуперативные теплообменные аппараты, Госэнергоиздат, 1962.
8. Арис Р., Анализ процессов в химических реакторах, изд-во «Химия», 1967.
9. Аронов И. З., Контактные газовые экономайзеры, изд-во, «Техника», Киев, 1964.
10. Бадылькес И. С., Данилов Р. Л., Абсорбционные холодильные машины, Пищепромиздат, 1966.
11. Берман С. С., Теплообменные аппараты и конденсационные устройства турбоустановок, Машгиз, 1959.
12. Бродянский В. М., Термодинамический анализ низкотемпературных процессов, изд. МЭИ, 1966.
13. Вейлас С., Химическая кинетика и расчеты промышленных реакторов, изд-во «Химия», 1967.
14. Гайдай С. Г., Кац М. И., Охрана труда на химическом предприятии, Профиздат, 1966.
15. Гельперин Н. И., Выпарные аппараты, Госхимиздат, 1947.
16. Гельперин Н. И., Дистилляция и ректификация, Госхимиздат, 1947.
17. Герасимов С. Г., Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов, изд-во «Высшая школа», 1967.
18. Григорьев В. А., Колач Т. А., Соколовский В. С., Темкин Р. М., Краткий справочник по теплообменным аппаратам, Госэнергоиздат, 1962.
19. Динамические характеристики промышленных объектов регулирования, Труды конференции общества приборостроителей в Кембридже, 1956 г., Изд-во иностранной литературы, 1960.
20. Долин П. А., Справочник по технике безопасности, Госэнергоиздат, 1960.
21. Домашнев А. Д., Конструирование и расчет химических аппаратов, Машгиз, 1961.
22. Дробиз А. М., К вопросу об автоматическом анализе состава многокомпонентных сред, в сб. «Автоматизация химических производств», вып. 4, ОКБА, 1959, стр. 14.
23. Егоров Н. Н., Охлаждение газа в скрубберах, Госэнергоиздат, 1954.
24. Евстафьев А. Г., Ретификационные установки, Машгиз, 1963.
25. Жаворонков Н. М., Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередача в скрубберах, изд-во «Советская наука», 1944.
26. Жаворонков Н. М., Аэров М. Э., Бобков С. И., Умник Н. Н., ЖХП, № 3, стр. 68, 1949.
27. Займовский А. С., Калашников В. В., Головин И. С., Тепловыделяющие элементы атомных реакторов, Атомиздат, 1966.
28. Закалова М. С., Конспект по курсу холодильные установки, изд. МЭИ, 1954.
29. Захарова З. Л., Рачинский А. С., Кузьмин П. А., Газовые контактные подогреватели и их применение в народном хозяйстве, изд-во «Недра», 1966.
30. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С., Теплопередача, изд-во «Энергия», 1965.
31. Капторович З. Б., Основы расчета химических машин и аппаратов, Машгиз, 1960.
32. Касаткин Г. А., Основные процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, 1961.
33. Каталог, Кожухотрубчатые теплообменники, НИИХИМАШ, 1959.
34. Каталоги-справочники, Кожухотрубчатые теплообменные аппараты, Колонные аппараты, Выпарные аппараты, Сушильные аппараты, Центхимнефтемаш, 1966.
35. Кафаров В. В., Методы кибернетики в химии и химической технологии, изд-во «Химия», 1968.
36. Кафаров В. В., Основы массопередачи, изд-во «Высшая школа», 1962.
37. Кэйс В. М., Лондон А. Л., Компактные теплообменники, изд-во «Энергия», 1967.
38. Кирсанов И. Н., Конденсационные установки, изд-во «Энергия», 1965.
39. Кичигин М. А., Костенко Г. Н., Теплообменные аппараты и выпарные установки, Госэнергоиздат, 1955.
40. Клименко А. П., Каневец Г. Е., Расчет теплообменных аппаратов на электронных вычислительных машинах, изд-во «Энергия», 1966.
41. Клинов Н. Я., Коррозия химической аппаратуры и коррозионностойкие материалы, изд-во «Машиностроение», 1967.
42. Колач Т. А., Радун Д. В., Выпарные станции, Машгиз, 1963.
43. Коган Я. Б., Электронные моделирующие установки и их применение для исследования систем автоматического регулирования, Физматгиз, 1959.

44. Колонные аппараты из стали и чугуна, Отраслевые нормалы, НИИХИММАШ, 1964.
45. Корсаков-Богатков С. М., Химические реакторы как объекты математического моделирования, изд-во «Химия», 1967.
46. Крамерс Х., Вестертерп К., Химические реакторы, расчет и управление ими, изд-во «Химия», 1967.
47. Круглый С. М., Производство хлора, каустической соды и водорода, изд-во «Высшая школа», 1967.
48. Кутагеладзе С. С., Борншанский В. М., Справочник по теплопередаче, Госэнергоиздат, 1959.
49. Лебедев П. Д., Расчет и проектирование сушильных установок, Госэнергоиздат, 1963.
50. Лебедев П. Д., Теплообменные, сушильные и холодильные установки, изд-во «Энергия», 1966.
51. Лебедев П. Д., Щукин А. А., Фабрично-заводская теплотехника, Госэнергоиздат, 1948.
- 52. Левин Б. И., Шубин Е. П., Теплообменные аппараты систем теплоснабжения, изд-во «Энергия», 1965.
53. Левин Л., Методы решения технических задач с использованием аналоговых вычислительных машин, изд-во «Мир», 1966.
54. Ломакин И. Л., Радун Д. В., Левачев А. Г., Балашов Л. Н., Автоматизация хлорных производств, изд-во «Химия», 1967.
55. Любимов Б. В., Специальные защитные покрытия в машиностроении, изд-во «Машиностроение», 1965.
56. Лыков М. В., Леончик Б. И., Распылительные сушилки, изд-во «Машиностроение», 1966.
57. Математические модели технологических процессов и разработка систем автоматического регулирования с переменной структурой, Сборник научных трудов Гинцветмета, № 21, изд-во «Металлургия», 1964.
58. Миндин Г. Р., Электронагревательные трубчатые элементы, изд-во «Энергия», 1965.
59. Михеев М. А., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1956.
60. Налимов В. В., Статистические методы описания химических и металлургических процессов, Металлургия, 1963.
61. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А., Процессы и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии, изд-во «Химия», 1964.
62. Перцев П. Л., Коробчанский О. А., Коваленко Л. М., Теплообменная аппаратура для химических производств, ЖХМ, 1967, № 10.
63. Петровский Ю. В., Фастовский В. Г., Современные эффективные теплообменники, Госэнергоиздат, 1962.
64. Плановский А. Н., Николаев Л. И., Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии, Гостоптехиздат, 1960.
- 65. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З., Процессы и аппараты химической технологии, изд-во «Химия», 1967.
66. Повилейко Р. П., Левинский Л. В., Техническая эстетика, изд-во «Знание», 1966.
67. Попов Р. Б., Автоматизация анализов многокомпонентных растворов, в сб. «Автоматизация химических производств», вып. 1/2, ОКБА, 1960.

68. Попов Р. Б., Метод автоматического контроля концентрации многокомпонентных растворов, в сб. «Теплоэнергетические и химикотехнологические приборы и регуляторы», вып. 4, Машгиз, 1959, стр. 153.
69. Поршнев И. Н., Автоматические конденсатоотводчики, Госэнергоиздат, 1957.
70. Прейскурнт № 23-03 на оборудование химическое, ч. 2, Госплан, 1960.
71. Рамм В. М., Теплообменные аппараты, Госхимиздат, 1948.
72. Рамм В. М., Абсорбция газов, изд-во «Химия», 1966.
73. Рачинский А. В., Лекция по курсу теплообменные установки, тепловой расчет скрубберов, ВЗЭИ, 1960.
74. Розенфельд Л. М., Ткачев Л. Г., Холодильные машины и аппараты, Госторгиздат, 1960.
75. Руководящие указания по расчету сосудов на прочность (РТМ), Изд-во Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1964.
76. Ряполов А. С., Изготовление и монтаж аппаратуры из нержавеющей стали, Гостройиздат, 1958.
77. Свенчанский А. Д., Малышев С. А., Низкотемпературные нагревательные элементы, изд. МЭИ, 1964.
78. Серов Е. П., Корольков Б. П., Динамика процессов в тепло- и массообменных аппаратах, изд-во «Энергия», 1967.
79. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е., Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей, Машгиз, 1954.
80. Соколов Е. Я., Тепловые характеристики теплообменных аппаратов, «Теплоэнергетика», 1958, № 5.
81. Соколов Е. Я., Бродянский В. М., Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения, изд-во «Энергия», 1968.
82. СССР, РТМ-42-62. Сосуды и аппараты, Нормы и методы расчета на прочность узлов и деталей, вып. 1, Изд-во Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, 1964.
83. Стабников В. Н., Ректификационные аппараты, изд-во «Машиностроение», 1965.
84. Таубман Е. И., Расчет переходных режимов в многоступенчатых выпарных установках и испарителях, Материалы II Всесоюзного совещания по тепло- и массообмену, Минск, 1964.
85. Таубман Е. И., Известия вузов, Энергетика, 1964, № 5.
86. Типаж ректификационных колонн для нефтеперерабатывающей промышленности, Гипронефтемаш, ЦБТИ, 1962.
87. Топтуненко Е. Т., Основы конструирования и расчета химической аппаратуры, изд. Харьковского университета, Харьков, 1968.
88. Удыма П. Г., Аппараты с погружными горелками, изд-во «Машиностроение», 1965.
89. Удыма П. Г., Реакционные аппараты анилинокрашенной промышленности, Машгиз, 1959.
90. Факторович Л. М., Теплоизоляционные работы и конструкции, Гостоптехиздат, 1957.
91. Хижняков С. В., Практические расчеты тепловой изоляции, Госэнергоиздат, 1959.
92. ЦБНТИ, Опреснение соленых вод, Сборник статей, Москва, 1966.
93. Ценник на монтаж оборудования, № 17, Оборудование предприятий промышленности, Гострой, 1960.
94. ЦКТИ им. И. И. Ползунова, Нормы расчета элементов паро-

вых котлов на прочность, Руководящие указания, вып. 11, Ленинград, 1965.

95. ЦКТИ им. И. И. Ползунова, Расчет трубных досок теплообменных аппаратов на прочность, Руководящие указания, вып. 12, Ленинград, 1965.

96. ЦКТИ им. И. И. Ползунова, Чистка конденсаторных трубок по способу фирмы МАН, Информационные материалы, Ленинград, 1967.

97. Черныбыльский И. Н., Выпарные установки, изд. Киевского университета, 1960.

98. Черныбыльский И. И., Бондарь А. Г., Гаевский Б. А., Городинская С. А., Ладиев Р. Я., Тананайко Ю. М., Миргородский В. Т., Машины и аппараты химических производств, Машгиз, 1962.

99. Черняк Я. С., Боченов Е. И., Ремонт оборудования нефтеперерабатывающих заводов, Гостехиздат, 1960.

100. Чечеткин А. В., Высокотемпературные теплоносители, Госэнергоиздат, 1962.

101. Чупахин Н. М., Монтаж, эксплуатация и ремонт холодильных установок, Пищепромиздат, 1968.

102. Шахов В. П., Техника безопасности при работе с радиоактивными веществами, Машгиз, 1962.

103. Шумелишский М. Г., Эжекторные холодильные машины, Госторгиздат, 1961.

104. Шумелишский М. Г., «Холодильная техника», 1958, № 2.

105. Шумелишский М. Г., Крылов К. С., «Холодильная техника», 1954, № 3.

106. Юренев В. Н. (ред.), Справочник энергетика промышленных предприятий, изд-во «Энергия», 1965.

107. Messing T., Über den Energieverbrauch von Dampfstrahlkälteanlagen, Kälttechnik, H. 12, 1954.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
О новых государственных стандартах на единицы измерений	4
Раздел первый	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕПЛОИСПОЛЗУЮЩИХ УСТАНОВОК	
Введение	5
Глава первая. Конструирование теплообменных аппаратов	7
1-1. Общие принципы конструирования теплообменных аппаратов	7
1-2. Факторы, определяющие конструкцию, вес и размеры теплообменного аппарата	9
1-3. Определение оптимального числа аппаратов	11
1-4. Время оптимального пробега аппаратов непрерывного действия	13
1-5. Назначение, классификация и устройство теплообменных аппаратов	14
Теплоносители	14
Теплообменники с рубашечным обогревом	16
Трубчатые теплообменники	18
Теплообменники с ребристой поверхностью	23
Пластинчатые теплообменники	25
1-6. Сравнительная характеристика рекуперативных теплообменников	29
1-7. Показатели качества оборудования	34
Технический уровень	34
Показатели долговечности и надежности	34
Эргономика и техническая эстетика	35
Пути интенсификации теплообмена в аппаратах	36
1-8. Определение затрат на изготовление и монтаж теплообменных аппаратов	37
Цена теплообменных аппаратов	37
Цена монтажа теплообменных аппаратов	41
1-9. Экономическая оценка эксплуатационных показателей теплообменных аппаратов	42
1-10. Экспериментальный метод оценки теплообменников	50
1-11. Последовательность и рекомендации при проектировании теплообменных аппаратов	52
Вопросы для самоконтроля	72

	Стр.
Глава вторая. Теплообменные аппараты с электрическим обогревом	74
2-1. Способы электронагрева	75
2-2. Электрические нагреватели сопротивления	76
2-3. Расчет электронагревателей сопротивления	79
2-4. Выбор трубчатых электрических нагревателей (ТЭН) для технологических установок	88
2-5. Индукционные нагреватели	94
Вопросы для самоконтроля	97
Глава третья. Проектирование выпарных установок	97
3-1. Классификация и выбор схемы выпарной установки	98
3-2. Типовые конструкции аппаратов выпарных установок	108
Выбор типа выпарного аппарата	108
3-3. Тепловой расчет многоступенчатой прямоточной выпарной установки	114
Определение количества выпаренной влаги по ступеням выпарной установки	114
Приближенное определение температур раствора, вторичного пара и температурных депрессий по ступеням установки	119
Определение количества экстра-пара	124
Определение количества выпаренной воды, поверхности нагрева по ступеням и расхода пара на установку	127
3-4. Выпарные установки с тепловыми насосами	129
3-5. Конструкции элементов выпарных аппаратов	132
3-6. Пример расчета трехступенчатой выпарной установки	144
3-7. Выпарные установки с погружными горелками	150
Назначение и принцип работы выпарной установки	150
Технологическая схема	151
Выпарной аппарат с погружными горелками	153
Последовательность расчета выпарных аппаратов с погружными горелками	154
Вопросы для самоконтроля	160
Глава четвертая. Смесительные теплообменные аппараты	161
4-1. Конструкции смесительных теплообменников	161
4-2. Тепло- и массообмен в смесительных теплообменниках	170
4-3. Тепловой баланс в смесительных теплообменниках	171
4-4. Тепловой расчет насадочных и полых смесительных теплообменников	175
4-5. Гидравлический режим и сопротивление смесительных теплообменников с насадкой	180
4-6. Распыление жидкости в полых смесительных теплообменниках	183
4-7. Расчет каскадного смесительного теплообменника	188
4-8. О струйных смесительных теплообменниках	191
4-9. Последовательность проектирования смесительных теплообменников	192
4-10. Пример теплового расчета насадочного скруббера	196
Вопросы для самоконтроля	199

	Стр.
Глава пятая. Проектирование ректификационных установок	200
5-1. Общие сведения	200
5-2. Диаграмма равновесия. Материальный баланс ректификационной колонны	201
5-3. Построение рабочих линий для расчета ректификационной колонны	207
5-4. Графический метод определения числа теоретических тарелок в ректификационной колонне	210
5-5. Тепловой баланс ректификационной колонны	213
5-6. Схемы ректификационных установок	214
5-7. Конструкции ректификационных колонн	226
5-8. Гидродинамика и гидравлическое сопротивление барботажных колонн	229
5-9. Определение размеров ректификационных колонн	232
Число единиц переноса	232
Число тарелок	238
Конструктивные элементы ректификационной колонны	239
5-10. Сравнение конструкций ректификационных колонн	244
5-11. Пути экономии тепла в ректификационных установках	244
5-12. Последовательность проектирования барботажной ректификационной колонны	246
Вопросы для самоконтроля	253
Глава шестая. Проектирование холодильных установок	
6-1. Общие сведения	254
6-2. Схемы парожеткторных холодильных установок	256
6-3. Испарители	262
6-4. Главные и вспомогательные эжекторы	266
6-5. Конденсаторы	272
6-6. Последовательность проектирования парожеткторной холодильной установки	276
6-7. Абсорбционные холодильные установки. Принцип действия и классификация	279
6-8. Процессы абсорбционной холодильной установки на i — ξ -диаграмме	283
6-9. Рабочие схемы и методика расчета абсорбционной холодильной установки	288
6-10. Аппараты абсорбционных холодильных установок	292
Конденсаторы	292
Испарители	294
Абсорберы	296
Генераторы	300
Теплообменники и переохладители	303
6-11. Пример расчета абсорбционной холодильной установки	306
Вопросы для самоконтроля	308
Глава седьмая. Динамика процессов тепло- и массообмена	309
7-1. Динамические характеристики рекуперативного теплообменника «труба в трубе»	310
7-2. Динамические характеристики выпарных аппаратов	317

	Стр.
7-3. Динамические характеристики ректификационных колонн	327
Вопросы для самоконтроля	331
Глава восьмая. Вспомогательное оборудование теплоиспользующих установок	331
8-1. Конденсаторы	331
8-2. Вспомогательные теплообменники	334
8-3. Насосы для перекачивания жидкостей	335
8-4. Конденсатоотводчики	339
8-5. Брызгоотделители	346
8-6. Устройства для разделения неоднородных жидких систем	349
8-7. Конденсатные баки и промежуточные емкости	353
8-8. Расширительные бачки-сепараторы	355
8-9. Устройства для очистки пара	356
8-10. Устройства для очистки конденсата	360
8-11. Трубопроводы теплоиспользующих установок	362
8-12. Специальные приборы для контроля технологических процессов	367
Вопросы для самоконтроля	370
Раздел второй	
изготовление, монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок	
Глава девятая. Конструкционные материалы и их выбор	371
9-1. Требования к конструкционным материалам	371
9-2. Чугуны	373
9-3. Стали	376
Углеродистые стали	376
Легированные стали	378
9-4. Цветные металлы	381
9-5. Сплавы на медной основе	383
9-6. Влияние низких температур и облучения в реакторах на механические свойства металлов	384
9-7. Коррозия металлов в химической аппаратуре	385
Влияние среды на коррозию	385
Защита металлов от коррозии	387
9-8. Неметаллические материалы	390
Силикатные материалы	391
Углеродистые материалы	393
Пластические массы	394
Каучуковые материалы	400
9-9. Металлопласт	400
Вопросы для самоконтроля	401
Глава десятая. Конструкция и технология изготовления теплообменных аппаратов в зависимости от применяемых материалов	402
10-1. Конструирование литой аппаратуры	403
10-2. Конструирование сварных элементов аппаратов	406
10-3. Влияние способов обработки заготовок	408
10-4. Влияние свойств материалов	411
Аппараты из сталей аустенитного класса	411
Аппараты из меди	412

	Стр.
Аппараты из сплавов алюминия	414
Особенности конструирования эмалированных аппаратов	414
Конструирование деталей из прессматериалов	415
Вопросы для самоконтроля	416
Глава одиннадцатая. Расчет элементов теплообменных аппаратов на прочность	417
11-1. Выбор метода расчета и коэффициента запаса прочности	417
11-2. Расчет цилиндрических сосудов на прочность	421
11-3. Расчет на прочность крышек и днищ	427
11-4. Расчет фланцевых соединений	431
11-5. Проверка напряжений в трубах и в корпусе аппарата жесткой конструкции	438
11-6. Расчет толщины трубной решетки	441
11-7. Расчет опор на прочность	447
Вопросы для самоконтроля	449
Глава двенадцатая. Изготовление теплообменных аппаратов	449
12-1. Общие положения	449
12-2. Чугунные теплообменники	451
12-3. Стальные теплообменники	452
Разработка технологического процесса	452
Заготовки деталей	453
Изготовление цилиндрического кожуха теплообменного аппарата	453
Контроль качества сварных соединений теплообменных аппаратов	464
Изготовление днищ и крышек	465
Линзовые компенсаторы	471
Фланцы	471
Термическая обработка	473
Изготовление и сборка трубчатки	473
Изготовление теплообменников для сверхвысоких давлений	479
12-4. Углеродистые теплообменники	482
12-5. Уплотнение резьбовых, фланцевых и сальниковых соединений	485
Вопросы для самоконтроля	490
Глава тринадцатая. Монтаж, испытание и приемка в эксплуатацию теплоиспользующих установок	490
13-1. Сборка теплообменников	490
13-2. Монтаж теплообменной аппаратуры	496
Организация монтажно-сборочных работ	496
Монтаж теплообменников	498
Монтаж арматуры и трубопроводов в пределах теплоиспользующей установки	500
13-3. Испытание сосудов на прочность и плотность	502
13-4. Тепловая изоляция теплоиспользующих установок	508
Значение тепловой изоляции	508
Свойства теплоизоляционных материалов	508
Монтаж теплоизоляционных конструкций	513

	Стр.
13-5. Регистрация и освидетельствование аппаратов и сосудов	515
Приемка в эксплуатацию теплоиспользующих установок	515
Вопросы для самоконтроля	518
Глава четырнадцатая. Эксплуатация, ремонт и охрана труда при обслуживании теплоиспользующих установок . .	518
14-1. Эксплуатация теплоиспользующих установок	518
Обязанности дежурного персонала	519
Соблюдение эксплуатационного режима	520
Теплотехнические испытания установок	522
14-2. Особенности эксплуатации некоторых теплоиспользующих установок	524
Установки для подогрева жидкостей	524
Испарители и паропреобразователи	525
Выпарные установки	528
Ректификационные колонны	532
Пароэжекторные холодильные установки	534
Абсорбционные холодильные установки	535
Конденсаторы	537
14-3. Ремонт теплоиспользующих установок	539
Виды и организация ремонтов	539
Некоторые ремонтные работы. Устранение неполадок и аварий	542
14-4. Охрана труда и ее организация	551
Вопросы для самоконтроля	557
Л и т е р а т у р а	558